


DECKBLATT

	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
	N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
EU 336	9K	---	---	LBA	RE	0001	00

Titel der Unterlage: Endlager Konrad, Analyse des normalbetrieblichen und störungsbedingten Aktivitätsflusses auf der Basis der technischen Merkmale von Kammerersatz und von Kammerabschlußbauwerken (PTB-SE-IB-56/Rev. 1, Stand: Dezember 1989)	Seite:	I.
	Stand:	Sept. 1989
Ersteller: PTB, 	Textnummer:	

Stempelfeld:

PSP-Element TP.9K/...: 2126

zu Plan-Kapitel: 3.4

PL



20/2/90

Freigabe für Behörden

PL



20/2/90

Freigabe im Projekt

Diese Unterlage unterliegt samt Inhalt dem Schutz des Urheberrechts sowie der Pflicht zur vertraulichen Behandlung auch bei Beförderung und Vernichtung und darf vom Empfänger nur auftragsbezogen genutzt, vervielfältigt und Dritten zugänglich gemacht werden. Eine andere Verwendung und Weitergabe bedarf der ausdrücklichen Zustimmung.

Revisionsblatt

BfS

EU 336	Projekt	PSP-Element	Obj. Kenn.	Aufgabe	UA	Lfd. Nr.	Rev.
	N A A N	N N N N N N N N N N	N N N N N N	X A A X X	A A	N N N N	N N
	9K	---	---	LBA	RE	0001	00

Titel der Unterlage: Endlager Konrad, Analyse des normalbetrieblichen und störungsbedingten Aktivitätsflusses auf der Basis der technischen Merkmale von Kammerversatz und von Kammerabschlußbauwerken (PTB-SE-IB-56/Rev. 1, Stand: Dezember 1989)

Seite:
II.
Stand:
Sept. 1989

Rev.	Revisionsst. Datum	verant. Stelle	Gegenzeichn. Name	rev. Seite	Kat. *)	Erläuterung der Revision

*) Kategorie R = redaktionelle Korrektur
 Kategorie V = verdeutlichende Verbesserung
 Kategorie S = substantielle Änderung
 Mindestens bei der Kategorie S müssen Erläuterungen angegeben werden.

PHYSIKALISCH - TECHNISCHE
BUNDESANSTALT

Abteilung Sicherstellung und Endlagerung radioaktiver Abfälle

INTERNER ARBEITSBERICHT



Endlager Konrad, Analyse des normalbetrieblichen und störungsbedingten
Aktivitätsflusses auf der Basis der technischen Merkmale von Kammerver-
satz und von Kammerabschlußbauwerken

Braunschweig, September 1989

PTB-SE-IB-56/Rev. 1
Stand: Dezember 1989

Endlager Konrad, Analyse des normalbetrieblichen und störungsbedingten Aktivitätsflusses auf der Basis der technischen Merkmale von Kammerersatz und von Kammerabschlußbauwerken

Inhalt:	Seite
1. Zusammenfassung	1
2. Radiologische Grundaspekte und normalbetriebliche Aktivitätsableitungen aus abgeschlossenen Einlagerungskammern	3
2.1 Eigenschaften von Konradhaufwerk (Material für den Kammerersatz und den Schüttkörper für KAB Modell 1)	3
2.1.1 Korngrößenanalyse	3
2.1.2 Aerosolrückhaltung	15
2.1.3 Verzögerung von Gasfreisetzungen	20
2.2 Modell und Parameter für die Aktivitätsflußanalyse	22
2.2.1 Aktivitätskonzentration radioaktiver Stoffe in der Kammeratmosphäre	22
2.2.2 Normalbetriebliche Aktivitätsableitungen	27
2.3 Ergebnisse für Einlagerungskammern mit KAB Modell 1	28
2.3.1 Anforderungsprofil für das KAB Modell 1	28
2.3.2 Kriterien für einlagerbare Gebinde und Kammeraktivitätsinventare	29
2.3.3 Aktivitätskonzentration radioaktiver Stoffe in der Kammeratmosphäre	32
2.3.4 Normalbetriebliche Aktivitätsableitungen	34
2.4 Ergebnisse für Einlagerungskammern mit KAB Modell 2	36
2.4.1 Anforderungsprofil für das KAB Modell 2	36
2.4.2 Kriterien für einlagerbare Gebinde und Kammeraktivitätsinventare	37

Inhalt (Fortsetzung)	Seite
2.4.3 Aktivitätskonzentration radioaktiver Stoffe in der Kammeratmosphäre	40
2.4.4 Normalbetriebliche Aktivitätsableitungen	42
2.5 Grundaspekte und Konsequenzen für den Einsatz von Pumpversatz anstelle von Schleuderversatz	43
3. Störungsbedingte Aktivitätsfreisetzungen	47
3.1 Einlagerungskammern mit KAB Modell 1 Ausfall der KAB-Materialbarriere	47
3.2 Einlagerungskammern mit KAB Modell 2 Druckentlastung über das Drucküberwachungs- und Regelsystem	51
4. Erkennungsmöglichkeiten und radiologische Bedeutung von Störungen an abgeschlossenen Einlagerungskammern	59
4.1 Meßmöglichkeiten bei Störungen an Einlagerungs- kammern mit KAB Modell 1 und Konsequenzen für Folgebmaßnahmen	60
4.2 Meßmöglichkeiten bei Störungen an Einlagerungs- kammern mit KAB Modell 2 und Konsequenzen für Folgebmaßnahmen	66
5. Literaturverzeichnis	68

1. Zusammenfassung

Eine detaillierte Korngrößenanalyse von Konradhaufwerk, wie es für den Kammerversatz und den Schüttkörper von Kammerabschlußbauwerken (KAB) Modell 1 zum Einsatz kommen soll, wurde durchgeführt. Aufbauend auf den ermittelten Kenngrößen des Haufwerks konnten die günstigen Eigenschaften bzgl. Aerosolrückhaltung und - in Verbindung mit dem großen Resthohlraumvolumen im Kammerversatz und KAB-Schüttkörper - auch die günstigen Eigenschaften bzgl. Verzögerung von Freisetzungen radioaktiver Gase aufgezeigt werden.

Das für versetzte und abgeschlossene Einlagerungskammern gültige Aktivitätsflußmodell wurde beschrieben. Die Lösungsgleichungen zugehöriger Differentialgleichungen sowie die wesentlichen Eingangsparameter wurden abgeleitet bzw. begründet.

Auf der Basis von Kriterien und orientierenden Richtwerten für einzulagernde Abfallgebinde wurden - getrennt für Einlagerungskammern mit KAB Modell 1 und solchen mit KAB Modell 2 - Berechnungen für nuklid- bzw. nuklidgruppenspezifische Aktivitätsinventare, Aktivitätskonzentrationen in der Kammeratmosphäre sowie normalbetriebliche und störungsbedingte Aktivitätsfreisetzungen durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Berechnungen weisen aus, daß die normalbetrieblichen Aktivitätsfreisetzungen sich innerhalb des dafür vorgesehenen konzeptionellen Rahmens bewegen und die Aktivitätsfreisetzungen für die unterstellten Störungen meist gering bzw. äußerst gering im Vergleich zu den jährlichen Antragswerten für die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Luft sind.

Lediglich die störungsbedingten Aktivitätsfreisetzungen von Rn222 (ausschließlich für unfixierte Ra226-haltige Abfälle in Behältern mit spezifizierter Dichtigkeit und in Kammern mit KAB Modell 1) sowie von C 14 (ausschließlich für Abfälle mit hoher C 14-Flüchtigkeit in Kammern mit KAB Modell 2 und langer Kammerstandzeit) lagen oberhalb des niedrigen Freisetzungsrahmens für die restlichen Radionuklide bzw. Radionuklidgruppen.

Es wurde aufgezeigt, daß durch administrative Maßnahmen, wie z.B. Einlagerung der wenigen in Frage kommenden Ra226-haltigen Abfälle weiter im Kammerinneren, die störungsbedingten Rn222-Freisetzungen aus Kammern mit KAB Modell 1 deutlich reduziert werden.

Die etwas oberhalb des niedrigen Freisetzungsrahmen liegenden Freisetzungswerte für C 14 mit hoher Flüchtigkeit im Falle von Kammern mit KAB Modell 2 sind im wesentlichen dadurch bedingt, daß von der Grundannahme ausgegangen wurde, ein bzgl. des maximalen Endlagerinventars durchschnittliches Kammerinventar C 14-haltiger Abfälle ausschließlich mit hoher Flüchtigkeit in einer einzelnen Kammer einzulagern. Eine Mischung von C 14-haltigen Abfällen mit hohen und niedrigeren C 14-Flüchtigkeiten hat eine deutliche Reduktion dieser störungsbedingten C 14-Aktivitätsfreisetzung aus Kammern mit KAB Modell 2 zur Folge. Die besondere Relevanz vom KAB Modell 2 ist ohnehin primär für die HTO-haltigen Abfälle gegeben.

Für die Einlagerung von Gebinden mit erhöhten Wasserstoffbildungsraten insbesondere infolge Korrosion von Metallen und Radiolyse ist nach dem heutigen Kenntnisstand der Einsatz von Pumpversatz (zwecks Hohlraumminimierung) anstelle von Schleuderversatz vorgesehen.

Auf der Basis der beschriebenen Verhältnisse für Kammern mit Pumpversatz (verringertes Resthohlraumvolumen, lokal erhöhte Abfallabdichtung, Rißbildungsmöglichkeiten, erhöhte Gasproduktion der dafür vorgesehenen Abfälle, veränderte Luft-/Gasfreisetzung aus versetzten Kammern) konnte für den Aktivitätsfluß festgestellt werden, daß die Ergebnisse der vorliegenden Analyse für normalbetriebliche und störungsbedingte Aktivitätsfreisetzungen aus versetzten und abgeschlossenen Einlagerungskammern - zumindest näherungsweise - auch zur Beurteilung des Emissionsverhaltens für den Einsatzfall von Pumpversatz herangezogen werden können.

Schließlich wurde die meßtechnische Erfassung der Aktivitätsfreisetzungen mittels der für den Einsatz vorgesehenen Strahlenschutzinstrumentierung untersucht und daraus ableitbare Konsequenzen für Folgemaßnahmen angegeben.

Für Einlagerungskammern mit KAB Modell 1 konnte insgesamt festgestellt werden, daß störungsbedingte Aktivitätsfreisetzungen mit der vorgesehenen Strahlenschutzinstrumentierung detektierbar und - mit erhöhten Aufwand wegen der niedrigen Aktivitätskonzentration - quantifizierbar sind. Aufgrund der geringen radiologischen Relevanz dieser Störungen steht ausreichend Zeit zur Verfügung, um geeignete Maßnahmen für die Beseitigung der Störung ergreifen zu können.

Für die analysierte Störung an Einlagerungskammern mit KAB Modell 2 'Fiktive Druckentlastung über das Drucküberwachungs- und Regulationssystem' konnte insgesamt festgestellt werden, daß die Aktivitätsfreisetzungen mit denselben Meßmethoden wie bei der Störung am KAB Modell 1 erfaßt werden können. Aufgrund der durch das Drucküberwachungs- und Regulationssystem ermöglichten Luftprobennahme ist eine quantitative meßtechnische Erfassung der Aktivitätsfreisetzung infolge einer Druckentlastung ohne Schwierigkeiten möglich. Die Störung ist ohne besondere radiologische Relevanz. Außer einer gezielten Streckung der Druckentlastung sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich.

- 2. Radiologische Grundaspekte und normalbetriebliche Aktivitätsableitungen aus abgeschlossenen Einlagerungskammern
- 2.1 Eigenschaften von Konradhaufwerk (Material für den Kammerersatz und den Schüttkörper für KAB Modell 1)

2.1.1 Korngrößenanalyse

Aus bei der Auffahrung der Grubenbaue gewonnenem Konradhaufwerk werden die Korngrößen kleiner 40 mm abgeseibt, um als Material für den Kammerersatz sowie den Schüttkörperaufbau von Kammerabschlußbauwerken (KAB Modell 1) zum Einsatz zu kommen. Etwa 50 Gew.-% des abgeseibten Haufwerks liegen im Korngrößenbereich unterhalb von 2 mm, d.h. der d50-Wert beträgt 2 mm. Die Einhaltung dieser Grundanforderungen wird labortechnisch überwacht /AGK 89a/.

Die Korngrößenverteilung von Konradhaufwerk wurde bisher mehrfach ausgemessen /z.B. MPA 87; PAM 89/ .

Für ein Korngrößengemisch 0/45 mm wurde die Korngrößenverteilung durch Trockensiebung bei gleichzeitigem nassen Abtrennen der Feianteile (<0.063 mm) bestimmt und in einem Prüfungszeugnis /MPA 87/ dokumentiert. In einer weiteren meßtechnischen Analyse /PAM 89/ einer anderen Probe von Konradhaufwerk wurden insbesondere die Feianteile durch weitergehende Naßsiebung und mittels Lasergranulometer bis zu Korngrößen von 1 µm ausgemessen. Die Meßergebnisse nach /MPA 87/ unter zusätzlicher Berücksichtigung der Korngrößenverteilung für die Feianteile (0.001 bis 0.063 mm) nach /PAM 89/ sind in der Tabelle 1 zusammengestellt und in den Abbildungen 1 und 2 graphisch aufgetragen.

Tabelle 1: Korngrößenverteilung von Konradhaufwerk gemäß /MPA 87/ und /PAM 89/

Korngröße (mm)	Siebdurchgang (Gew.-%)	Siebrückstand (Gew.-%)
45.0	100.0	---
31.5	93.7	6.3
22.4	88.1	5.6
16.0	81.0	7.1
11.2	72.6	8.4
8.0	66.5	6.1
5.0	58.6	7.9
2.0	49.9	8.7
0.71	41.7	8.2
0.25	26.0	15.7
0.09	18.5	7.5
0.063	12.8	5.7
0.03	9.3	3.5
0.01	6.0	3.3
0.003	3.1	2.9
0.001	---	3.1

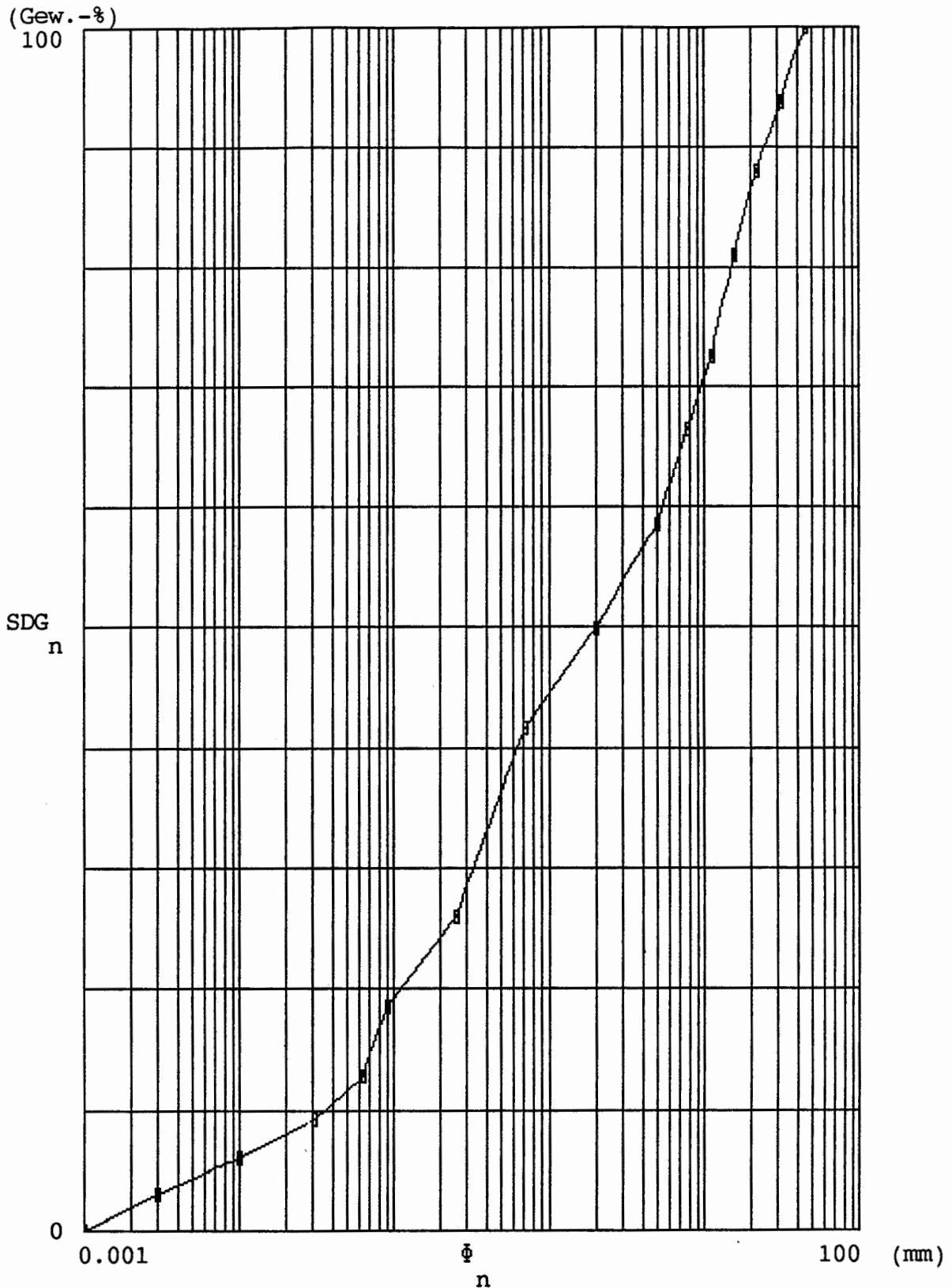


Abb. 1: Siebdurchgang SDG (Gew.-%) von Konradhufwerk für Korndurchmesser Φ zwischen $\Phi_{\min} = 0.001$ mm und $\Phi_{\max} = 45$ mm gemäß /MPA 87; PAM 89/ in halblogarithmischer Darstellung

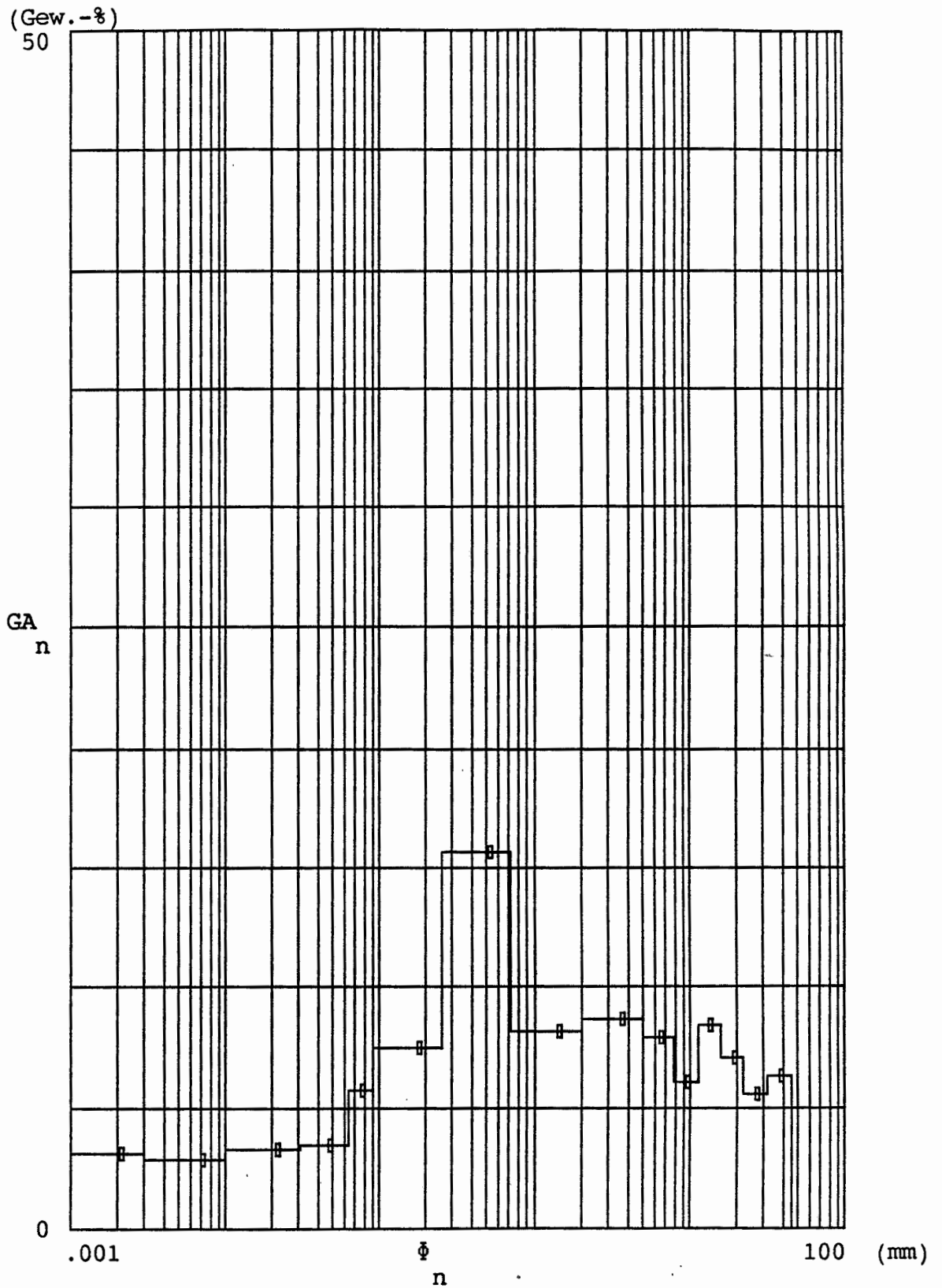


Abb. 2: Relative Gewichtsanteile GA (Gew.-%) der Siebrückstände pro Korngrößenintervall von Konradhufwerk für Korndurchmesser ϕ von $\phi_{\min} = 0.001$ mm bis $\phi_{\max} = 45$ mm gemäß /MPA 87; PAM 89/ in halblogarithmischer Darstellung

Aus der gewichtsbezogenen Korngrößenverteilung (Tab. 1, Abb. 1 und 2) ist zu ersehen, daß

- die Einzelpartikel des Konradhaufwerks zu etwa 50 Gew.-% im Korngrößenbereich unterhalb von 2 mm liegen
- ein Maximum bei Partikeldurchmessern um etwa 0.5 mm und
- noch relativ große Partikelanteile im Durchmesserbereich von einigen μm vorliegen.

Aus radiologischer Sicht ist die absolute Korngrößenverteilung, d.h. die Partikelzahl pro Durchmesserintervall und Volumeneinheit des Haufwerks, von primärer Bedeutung. Der mittlere Partikeldurchmesser ist dann ein Maßstab für die freie Weglänge in den Zwischenräumen des Haufwerks.

Im folgenden wird deshalb die absolute Korngrößenverteilung auf der Basis der gemessenen gewichtsbezogenen Korngrößenverteilung ermittelt. Dabei kann - wie visuelle Kontrollen des Haufwerks bestätigen, angenommen werden, daß die Partikelform unabhängig von der Partikelgröße ist. Als Vereinfachung wurde von einer Kugelförmigkeit der Partikel ausgegangen. Wie Kontrollrechnungen für andere Partikelformen (Würfel-, Stab-, Quaderform usw.) zeigten, hat die Partikelform praktisch keinen Einfluß auf die durchmesserbezogene Verteilungsrelation der Partikelzahlen.

Mit diesen beiden Grundannahmen wird das mittlere Kornvolumen V_m und der mittlere Durchmesser D der Haufwerkspartikel für die 15 Korngrößenintervalle (siehe Tabelle 1) nach den folgenden Formeln berechnet:

$$n := 1 \dots 15$$

$$V_{m_n} := \frac{4 \cdot \frac{\pi}{3} \cdot \int_{\Phi_n}^{\Phi_{n+1}} \Phi^3 d\Phi}{\Phi_{n+1} - \Phi_n} \quad (1)$$

$$D_n := 2 \cdot \left[\frac{V_{m_n} \cdot 3}{n \cdot 4 \cdot \pi} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

mit V_m = mittleres Kornvolumen pro Korngrößenintervall (mm³)
 Φ mit Index n = untere Grenze des Korngrößenintervalls (mm)
 Φ mit Index $n+1$ = obere Grenze des Korngrößenintervalls (mm)
 D = mittlerer Partikeldurchmesser pro Korngrößenintervall (mm)
 n = Index der 15 Korngrößenintervalle von 0.001 mm bis 45 mm
 (siehe Tabelle 1)

Die auf ein Gesamtkornvolumen von 1 Kubikmeter (= 1 E+09 Kubikmillimeter) normierte Kornzahl NKZ mit den Einzelkornvolumen V_m ergibt sich nach der Beziehung:

$$NKZ_n := \frac{10^9}{V_m \cdot n} \quad (3)$$

Die Kornzahl KZ pro Korngrößenintervall und Kubikmeter Gesamtkornvolumen erhält man durch durch Wichtung der normierten Kornzahl NKZ mit dem relativem Gewichtsanteil GA im Korngrößenspektrum:

$$KZ_n := \frac{NKZ_n \cdot GA_n}{\sum_n GA_n} \quad (4)$$

Der relative Kornanteil KA (%) ergibt sich definitionsgemäß nach der Relation:

$$KA_n := \frac{KZ_n}{\sum_n KZ_n} \cdot 100 \quad (\%) \quad (5)$$

Schließlich erhält man den mittleren Korndurchmesser Φ_m des gesamten Haufwerksspektrums als gewichtetes Mittel der mittleren Korndurchmesser D (nach Gleichung (2)) und den relativen Kornanteilen KA (nach Gleichung (5)):

$$\Phi_m := \frac{\sum_n [D_n \cdot KA_n]}{\sum_n KA_n} \quad (6)$$

Die Ergebnisse nach den Gleichungen (1), (2), (4), (5) sind in der Tabelle 2 zusammengestellt. Die relativen Kornanteile KA sind zusätzlich in der Abbildung 3 graphisch aufgetragen. Danach ist zu ersehen, daß insbesondere die auf die Kornzahl bezogenen Kornanteile in den Korngrößenintervallen mit kleinen Korndurchmessern sehr stark (um bis zu mehr als 12 Größenordnungen) gegenüber denjenigen in den Korngrößenintervallen mit großen Korndurchmessern dominieren, d.h. daß im Konradhaufwerk relativ wenige größere Haufwerkspartikel neben um Größenordnungen vielfältigeren Mengen kleiner und kleinster Haufwerkspartikel vorliegen.

Der auf die Kornzahl bezogene mittlere Korndurchmesser errechnet sich nach der Gleichung (6) zu: $\Phi_m = 0.0023$ mm. Das bedeutet, daß der mittlere Korndurchmesser des gesamten Haufwerks praktisch ausschließlich durch das niedrigste Korngrößenintervall bestimmt wird.

Tabelle 2: Kenngrößen des Konradhaufwerks (mittlere Kornvolumina V_m , mittlere Korndurchmesser D , Kornzahlen KZ pro Kubikmeter Gesamtkornvolumen und relative Kornanteile KA), die auf der Basis von gewichtsbezogenen Korngrößenverteilungen gemäß /MPA 87; PAM 89/ ermittelt wurden

Korngrößen- intervalle (mm)	D (mm)	V_m (mm ³)	KZ (Kornzahl/m ³ Kornvolumen)	KA (%)
0.001-0.003	0.0022	5.2E-09	5.9E+15	9.73E+01
0.003-0.01	0.0071	1.9E-07	1.6E+14	2.57E 00
0.01 -0.03	0.022	5.2E-06	6.3E+12	1.04E-01
0.03 -0.063	0.048	5.9E-05	5.9E+11	9.7 E-03
0.063-0.09	0.077	2.4E-04	2.4E+11	3.9 E-03
0.09 -0.25	0.18	3.1E-03	2.4E+10	3.9 E-04
0.25 -0.71	0.51	7.1E-02	2.2E+09	3.6 E-05
0.71 -2.0	1.45	1.6E 00	5.1E+07	8.4 E-07
2.0 -5.0	3.70	2.7E+01	3.3E+06	5.4 E-08
5.0 -8.0	6.61	1.5E+02	5.2E+05	8.6 E-09
8.0 -11.2	9.68	4.8E+02	1.3E+05	2.1 E-09
11.2 -16.0	13.74	1.4E+03	6.2E+04	1.0 E-09
16.0 -22.4	19.38	3.8E+03	1.9E+04	3.1 E-10
22.4 -31.5	27.20	1.1E+04	5.3E+03	8.7 E-11
31.5 -45.0	38.64	3.0E+04	2.1E+03	3.4 E-11

Anzumerken ist, daß die Ergebnisse der vorliegenden Korngrößenanalyse praktisch nicht beeinflusst werden durch die großen Kornfraktionen, da diese nur einen verschwindend geringen Anteil in dem auf die Kornzahl bezogenen Haufwerksspektrum haben.

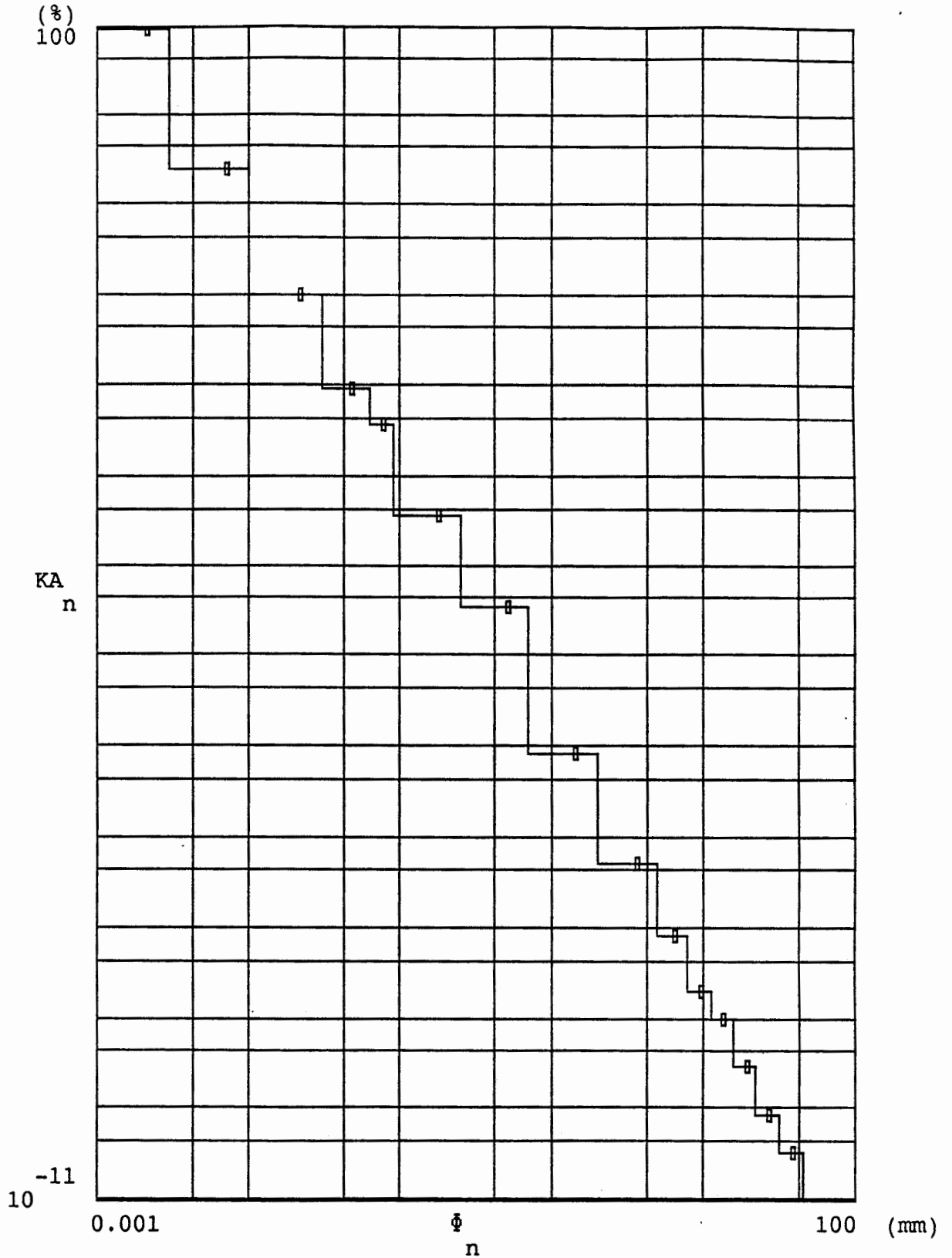


Abb. 3: Relative Kornanteile KA (%) pro Korngrößenintervall von Konradhaufwerk für Korndurchmesser Φ von $\Phi_{min} = 0.001$ mm bis $\Phi_{max} = 45$ mm in doppeltlogarithmischer Darstellung

Um den Einfluß der Kornfraktionen mit kleinen Korndurchmessern quantitativ zu erfassen, wird unterstellt, daß beispielhaft die Kornfraktionen der 4 kleinsten Korngrößenintervalle im Bereich von 0.001 mm bis 0.063 mm unterdrückt oder ausgesiebt werden. Eine solche Zusatzbetrachtung ist geeignet, um die Schwankungsbreite zumindest theoretisch möglicher Siebkennlinien abzudecken oder auch um erkennen zu können, welchen Einfluß z.B. ein Aussieben von Feinstanteilen des Haufwerkspektrums zwecks Fließfähigkeitserhöhung im Bereich der Firstanbindung von Kammerabschlußbauwerken hat.

Wegen der Unterdrückung der 4 Kornfraktionen in den niedrigsten Korngrößenintervallen wurden die restlichen 11 Kornfraktionen wieder auf insgesamt 100 % umnormiert. Die auf diese Weise ummodellierten Siebdurchgänge und Siebrückstände sind in den Abbildungen 4 und 5 graphisch aufgetragen.

Für das auf 11 Kornfraktionen reduzierte Korngrößenspektrum sind die Zahlenwerte für die nach den Gleichungen (1) bis (5) berechneten Kornzahlen KZ bzw. relativen Kornanteile KA in der Tabelle 3 zusammengestellt. Die relativen Kornanteile KA sind zusätzlich in der Abb. 6 graphisch aufgetragen.

Tabelle 3: Kenngrößen des bzgl. der 4 kleinsten Kornfraktionen (0.001 mm bis 0.063 mm) reduzierten Konradhaufwerks (Kornzahlen KZ pro Kubikmeter Gesamtkornvolumen und relative Kornanteile KA)

Korngrößenintervalle (mm)	KZ 3 (Kornzahl/m Kornvolumen)	KA (%)
0.001-0.063	---	---
0.063-0.09	2.7E+11	9.0E+01
0.09 -0.25	2.7E+10	9.1E+00
0.25 -0.71	2.5E+09	8.4E-01
0.71 -2.0	5.9E+07	2.0E-02
2.0 -5.0	3.8E+06	1.2E-03
5.0 -8.0	6.0E+05	2.0E-04
8.0 -11.2	1.5E+05	4.9E-05
11.2 -16.0	7.1E+04	2.4E-05
16.0 -22.4	2.1E+04	7.1E-06
22.4 -31.5	6.1E+03	2.0E-06
31.5 -45.0	2.4E+03	8.0E-07

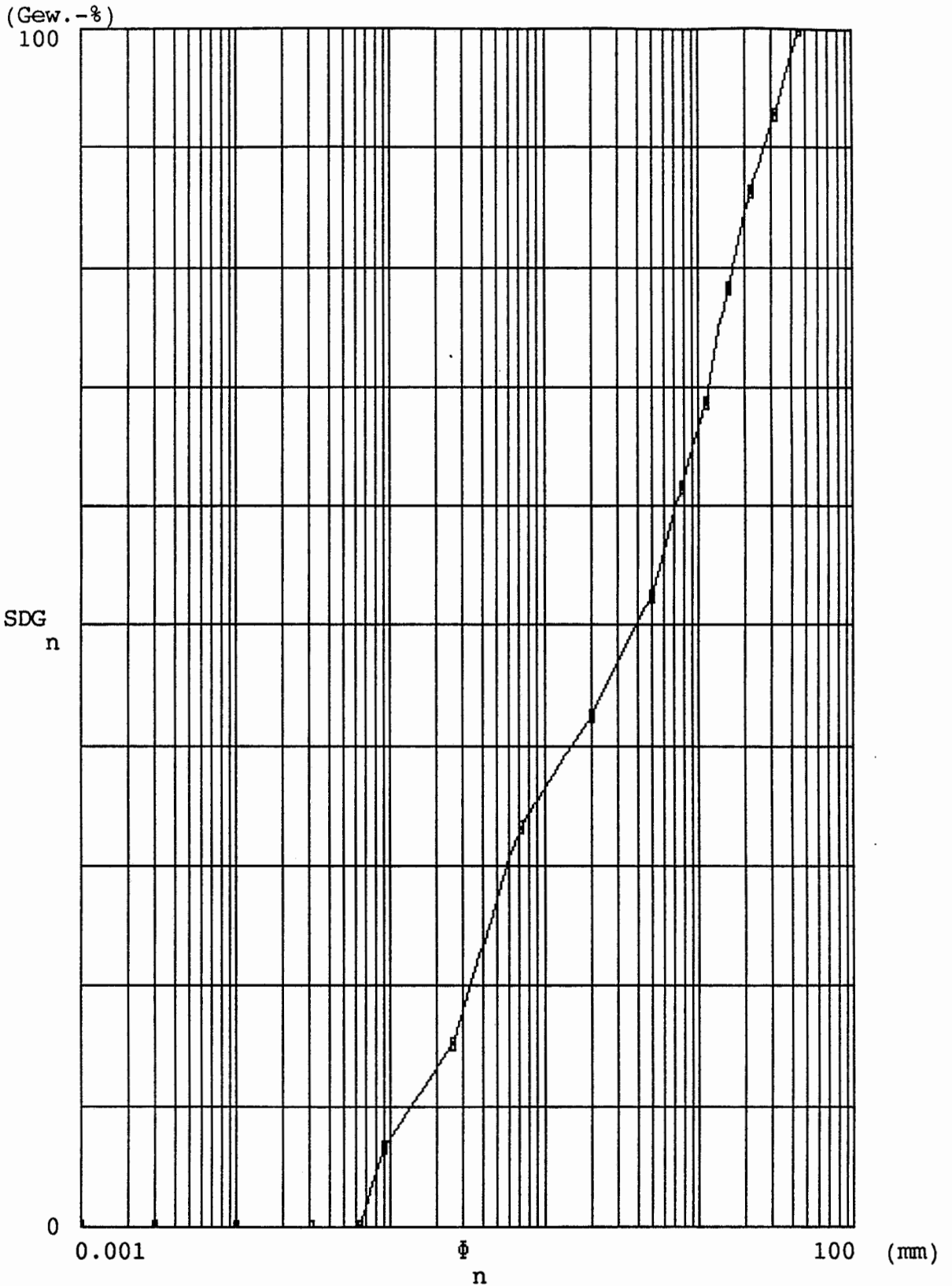


Abb. 4: Siebdurchgang SDG (Gew.-%) von Konradhaufwerk für Korndurchmesser ϕ zwischen $\phi_{\min} = 0.063$ mm und $\phi_{\max} = 45$ mm in halblogarithmischer Darstellung

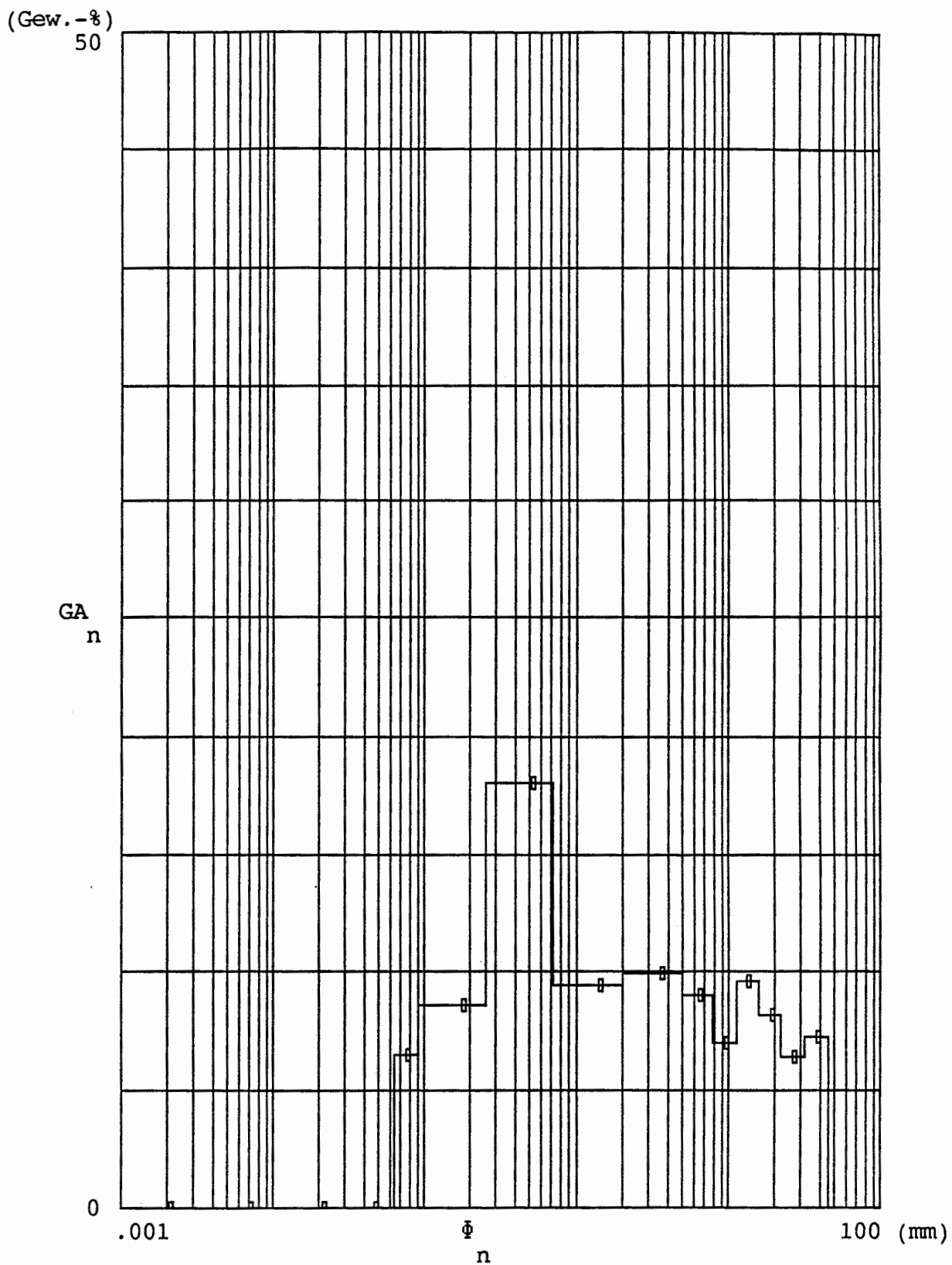


Abb. 5: Relative Gewichtsanteile GA (Gew.-%) der Siebrückstände pro Korngrößenintervall von Konradhaufwerk für Korndurchmesser ϕ von $\phi_{min} = 0.063$ mm bis $\phi_{max} = 45$ mm in halblogarithmischer Darstellung

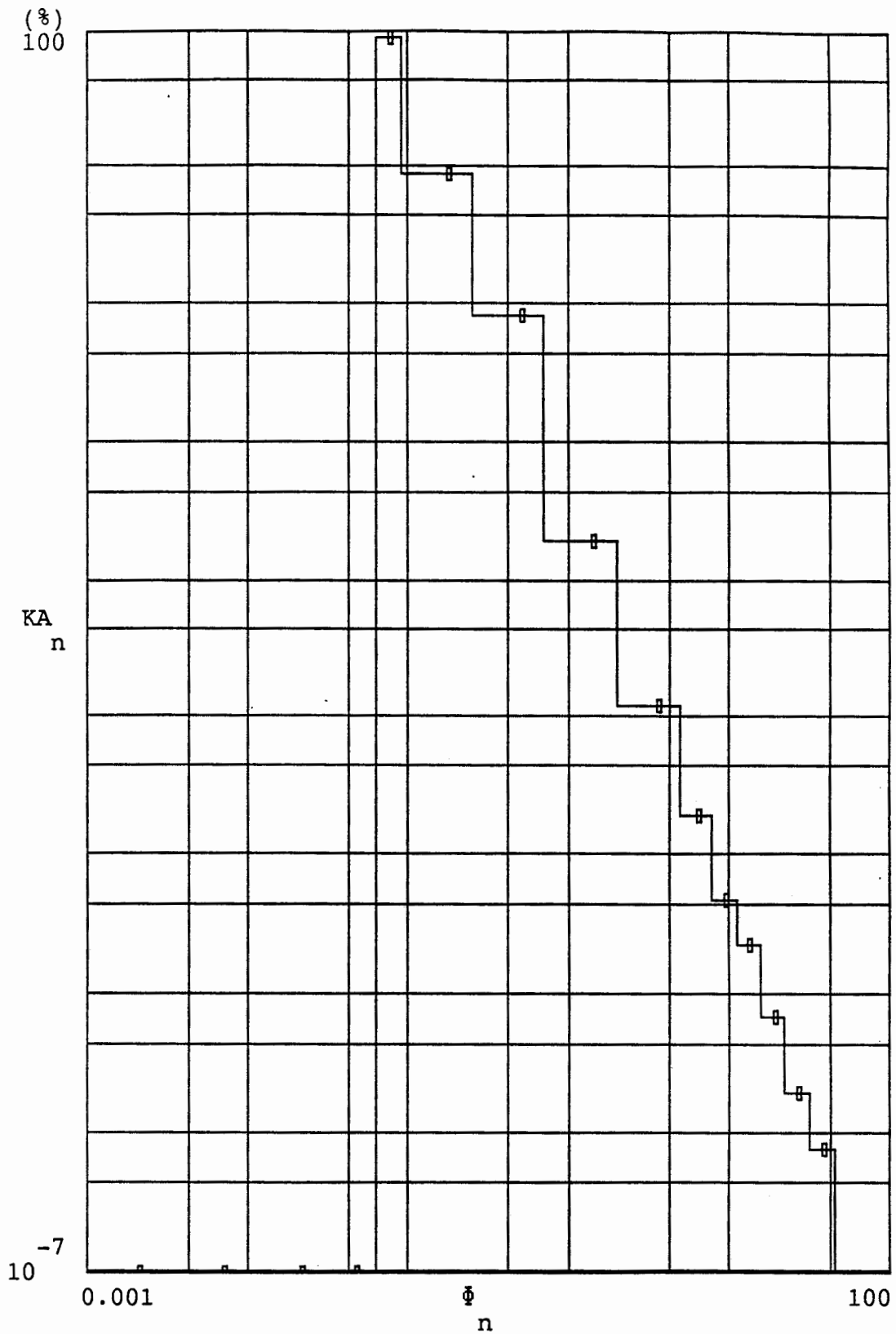


Abb. 6: Relative Kornanteile KA (%) pro Korngrößenintervall von Konradhaufwerk für Korndurchmesser ϕ von $\phi_{\min} = 0.063$ mm bis $\phi_{\max} = 45$ mm in doppeltlogarithmischer Darstellung

Nach Tabelle 3 und der Abbildung 6 ist auch für das 'ausgesiebte' Konradhaufwerk zu ersehen, daß die auf die Kornzahl bezogenen Kornanteile in den Korngrößenintervallen mit kleinen Korndurchmessern sehr stark (um bis zu mehr als 8 Größenordnungen) gegenüber denjenigen in den Korngrößenintervallen mit großen Korndurchmessern dominieren.

Der auf die Kornzahl bezogene mittlere Korndurchmesser errechnet sich nach der Gleichung (6) zu: $\bar{\phi}_m = 0.09$ mm. Das bedeutet auch für das 'ausgesiebte' Konradhaufwerk, daß der mittlere Korndurchmesser des gesamten Haufwerks hauptsächlich durch das niedrigste Korngrößenintervall bestimmt wird.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß für die beiden betrachteten Kornspektren von Konradhaufwerk

- die Kornanteile mit kleinen Korndurchmessern von starker Dominanz sind, d.h. relativ wenige größere Haufwerkspartikel 'schwimmen' in einer Vielfalt (um bis zu etwa 12 bzw. 8 Größenordnungen höheren Anteilen) von kleineren Partikeln.
- die auf die Kornzahl bezogenen mittleren Durchmesser des gesamten Haufwerks bei Werten von 0.002 mm bzw. 0.09 mm liegen, d.h. die auf die Kornzahl bezogenen mittleren Korndurchmesser sind erwartungsgemäß klein gegen die gewichtsbezogenen mittleren Durchmesser (d_{50} -Werte) von etwa 2 mm.

Da die auf die Kornanzahl bezogenen mittleren Korndurchmesser einen Maßstab für die freie Weglänge der Aerosole im Luftstrom durch die Kornzwischenräume darstellen, ist bereits aus der Größe der mittleren Korndurchmesser ersichtlich, daß das Konradhaufwerk gut für die Aerosolrückhaltung geeignet ist.

2.1.2 Aerosolrückhaltung

Für die Aerosolrückhaltung im Konradhaufwerk - als Material für den Kammerersatz und für den Schüttkörper von Kammerabschlußbauwerken (KAB Modell 1) - sind folgende Ab- und Anlagerungsprozesse von Relevanz:

- Sedimentation
(Partikel werden aus einem Gasstrom in Abhängigkeit von der Partikelmasse und der Gasviskosität infolge von Gravitationskräften abgelenkt und können sich an den Materieoberflächen ab- oder anlagern.)
- Trägheitsimpaktion
(Partikel in einem Gasstrom folgen möglichst den Strömungslinien. Bei gekrümmten Strömungslinien (z.B. im Konradhaufwerk) können die Partikel infolge ihres Impulses die Strömungslinien verlassen und sich an den umgebenden Materieoberflächen ab- oder anlagern.)
- Interzeption
(Partikel, deren Strömungslinienabstand zur Oberfläche eines Hindernisses kleiner oder gleich dem Partikelradius ist, können auch ohne Abweichung von der Strömungslinie ab- oder angelagert werden.)
- Brown'sche Bewegung
(Zu kleinen Partikelradien hin steigt die Intensität der Brown'schen Bewegung und als Folge hiervon die Wirksamkeit der Partikelablagerung. Außerdem kann die Brown'sche Bewegung zum Zusammenstoß von Partikeln und damit zu Agglomeration und Koagulation führen.)
- Diffusionsphorese (Plateout)
(Insbesondere kleine Partikel (mit Partikeldurchmesser $< 1\mu\text{m}$) folgen dem Konzentrationsgefälle und gelangen so zu den umgebenden Materieoberflächen, wo sie sich ab- oder anlagern können.)
- turbulente Koagulation
(Infolge von Veränderungen des Strömungsverlaufs (Richtungs- und Querschnittsänderungen) kann es zu lokalen Turbulenzen kommen, die zu Partikelzusammenstößen und der damit einhergehenden Koagulation von Partikeln führen.)
- Auskondensation
(Bei hohen Luftfeuchten stellen Partikel Kondensationskeime dar. Infolge der Anlagerung von Luftfeuchte an Partikeln steigt deren Ablagerungsverhalten aus der Gasströmung.)
- Elektrostatische Kräfte
(Infolge elektrostatischer Aufladung wirken auf die Partikel Zusatzkräfte quer zur Strömungsrichtung und führen zur Partikelablagerung aus der Gasströmung.)

Für das Ablagerungsverhalten der Aerosole bildet die Sedimentation einen Hauptprozeß. Die Sedimentationsgeschwindigkeit V_s wird nach der für kleine Reynoldszahlen gültigen Formel (Stoke'sches Gesetz) berechnet:

$$V_s := \frac{dp^2 \cdot (\rho_P - \rho_L) \cdot g}{18 \cdot \eta_k \cdot \rho_L} \quad (\text{m/s}) \quad (7)$$

mit

- V_s = Sinkgeschwindigkeit von Aerosolen infolge Sedimentation (m/s)
- dp = Aerosoldurchmesser (1 μm bis 25 μm)
- ρ_P = Dichte der Aerosolpartikel (etwa 3000 kg/Kubikmeter)
- ρ_L = Dichte der Luft (etwa 1.2 kg/Kubikmeter)
- η_k = kinematische Zähigkeit der Luft (1.6E-05 Quadratmeter/s)
- m = Index für verschiedene Aerosoldurchmesser

Die berechneten Werte der Sedimentationsgeschwindigkeit von Aerosolen sind in der Abb. 7 graphisch aufgetragen. Die Geschwindigkeitswerte liegen im Bereich zwischen $V_s = 0.000085 \text{ m/s} = 0.3 \text{ m/h} = 7.3 \text{ m/d}$ für Aerosoldurchmesser von $dp = 1 \mu\text{m}$ und $V_s = 0.053 \text{ m/s} = 190 \text{ m/h} = 4600 \text{ m/d}$ für Aerosoldurchmesser von $dp = 25 \mu\text{m}$.

Danach ist zu erkennen, daß es allein infolge von Sedimentationsprozessen zu einer weitgehenden Aerosolabscheidung aus der Kammeratmosphäre bereits im Stundenbereich nach der Aerosolfreisetzung aus den Gebinden kommt.

Weiterhin ist hier anzumerken, daß durch die Eigenschaften des Konradhaufwerks (als Material für den Kammerversatz und den KAB-Schüttkörper) günstige Bedingungen für Ab- bzw. Anlagerungen von Aerosolen vorgegeben sind. Neben den sehr kleinen mittleren Korndurchmessern - als Maßstab für die freie Aerosolweglänge (siehe Kap. 2.1.1) - besitzt das Konradhaufwerk auch eine große spezifische Oberfläche (etwa 10 - 20 Quadratmeter pro Gramm Konradhaufwerk /IFG 87/, was eine gute Voraussetzung für Aerosolab- bzw. -anlagerung darstellt.

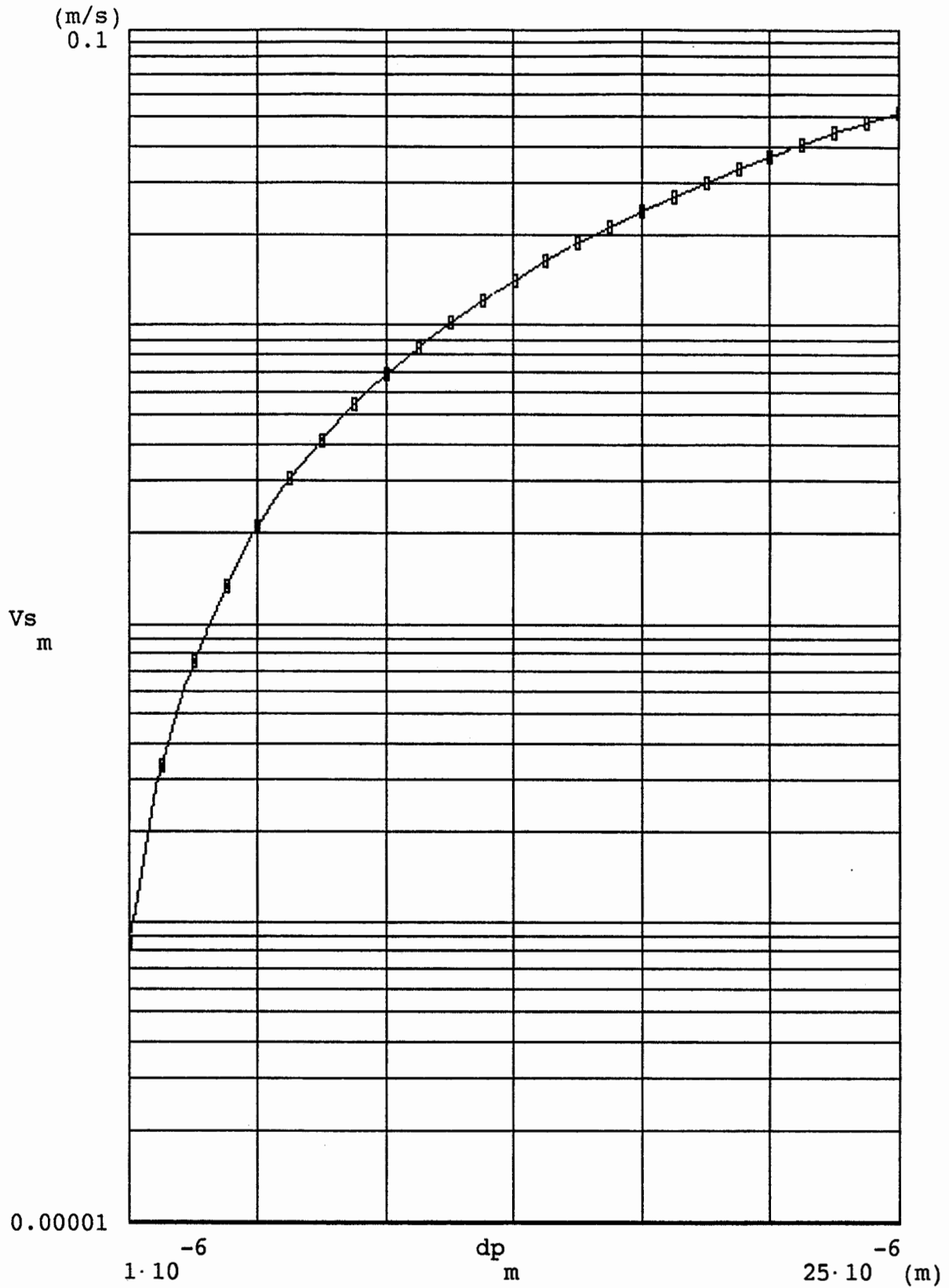


Abb. 7: Sedimentationsgeschwindigkeit V_s von Aerosolen in Abhängigkeit vom Aerosoldurchmesser d_p ($d_p = 1 \mu\text{m}$ bis $25 \mu\text{m}$)

Die Strömungsverhältnisse durch einen Schüttkörper aus Konradhaufwerk können mit Hilfe der Darcy-Beziehung ermittelt werden. Danach berechnet sich der Volumenstrom durch einen Schüttkörper in Abhängigkeit von der Luftdruckdifferenz über den Schüttkörper folgendermaßen:

$$Q_L := \frac{K \cdot F \cdot \delta p \cdot p_m}{L \cdot \eta L \cdot p_u} \quad (\text{Kubikmeter/s}) \quad (8)$$

- mit Q_L = Volumenstrom durch einen Schüttkörper aus Konradhaufwerk (Kubikmeter/s)
 K = Permeabilität des Schüttkörpers (Quadratmeter)
 F = Querschnittsfläche des Schüttkörpers (Quadratmeter)
 L = Länge des Schüttkörpers (Meter)
 δp = Luftdruckdifferenz über den Schüttkörper (hPa)
 p_u = Luftdruck vor dem Schüttkörper (ca. 1150 hPa)
 p_m = mittlerer Luftdruck (= $p_u + \delta p/2$) (hPa)
 ηL = Viskosität von Luft (ca. $1.8 \cdot 10^{-7}$ hPa.s)
 m = Index für verschiedene Luftdruckdifferenzen

Aus dem Volumenstrom durch einen Schüttkörper Q_L berechnet sich die Strömungsgeschwindigkeit V_L der durchströmenden Luft nach der folgenden Beziehung:

$$V_L := \frac{Q_L}{\epsilon \cdot F} \quad (\text{Meter/s}) \quad (9)$$

mit ϵ = Porosität des Schüttkörpers (ca. 0.3 für Konradhaufwerk)

Für einen Schüttkörper aus Konradhaufwerk, wie er durch ein Kammerabschlußbauwerk Modell 1 dargestellt wird, sind auslegungsgemäß folgende Permeabilitätswerte und geometrische Abmessungen vorgegeben:

- Permeabilität K : kleiner als $1 \cdot 10^{-10}$ Quadratmeter
- Schüttkörperlänge L : etwa 20 Meter
- Querschnittsfläche F des Schüttkörpers: etwa 25 Quadratmeter

Mit diesen Werten und beispielhaften Druckdifferenzen $\delta p = 1, 5, 30$ hPa berechnen sich die folgenden Volumenströme und Strömungsgeschwindigkeiten:

$\delta p = 1$ hPa:	$Q_L = 0.00069$ Kubikmeter/s	$V_L = 0.00009$ Meter/s
$\delta p = 5$ hPa:	$Q_L = 0.0035$ Kubikmeter/s	$V_L = 0.00047$ Meter/s
$\delta p = 30$ hPa:	$Q_L = 0.021$ Kubikmeter/s	$V_L = 0.0028$ Meter/s

Die Durchlässigkeit von Schüttkörpern für Aerosole unter Berücksichtigung der Ablagerungsprozesse läßt sich nach der folgenden Beziehung berechnen:

$$A1_{m,n} := A0 \cdot \exp \left[- \frac{\left[\frac{Vs}{n} \right]}{\left[\frac{Hs \cdot VL}{m} \right]} \cdot L \right] \quad (10)$$

- mit
- A1 = Aktivitätskonzentration für Aerosole nach Durchströmen des Schüttkörpers (Bq/Kubikmeter)
 - A0 = Aktivitätskonzentration von Aerosolen vor Eintritt in den Schüttkörper (Bq/Kubikmeter)
 - Vs = Sedimentationsgeschwindigkeit (m/s) von Aerosolen (berechnet nach der Formel (7))
 - VL = Strömungsgeschwindigkeit (m/s) durch den Schüttkörper (berechnet nach den Formeln (8) und (9))
 - Hs = Länge der Driftstrecke (Sedimentationsstrecke) senkrecht zur Strömungslinie. Nach Durchlaufen der Strecke Hs ist die luft-/gasgetragene Aerosolkonzentration infolge Ab-/Anlagerungsprozesse auf etwa den 1/3-Teil abgefallen.
 - L = Länge des Schüttkörpers (m)
 - n = Index für die verschiedenen Partikeldurchmesser
 - m = Index für verschiedene Druckdifferenzen über den Schüttkörper

Die Rückhaltefaktoren des Schüttkörpers für Aerosole RA (%) lassen sich dann nach der folgenden Gleichung berechnen:

$$RA_{m,n} := \left[1 - \exp \left[- \frac{\left[\frac{Vs}{n} \right]}{\left[\frac{Hs \cdot VL}{m} \right]} \cdot L \right] \right] \cdot 100 \quad (\%) \quad (11)$$

Mit den Werten für

- Vs nach der Gleichung (7),
- VL nach den Gleichungen (8) und (9),
- der Schüttkörperlänge L = 20 m
- dem Schüttkörperquerschnitt F = 25 Quadratmeter
- und einer Sedimentationslänge Hs = 2 mm
bis zur festen Ablagerung von etwa 2/3 der Aerosole. Bei mittleren Korn-durchmessern des Konradhaufwerks von 0.002 mm bzw. 0.09 mm ist Hs = 2 mm als abdeckend anzusehen.

ergibt sich für das betrachtete Aerosolspektrum nach der Gleichung (11) eine praktisch 100 prozentige Aerosolabscheidung im Schüttkörper aus Konradhaufwerk.

2.1.3 Verzögerung von Gasfreisetzungen

Für den zeitlichen Druckverlauf $\delta P(t)$ über einen Schüttkörper nach einer anfänglichen Druckbeaufschlagung δp gilt /GSF 85/:

$$\delta P(t) = \delta p \cdot \exp(-t/T) \quad (12)$$

mit der Druckabklingkonstante T :

$$T := \frac{V_0 \cdot L \cdot \eta L}{p_u \cdot K \cdot F \cdot 3600} \quad (h) \quad (13)$$

Der zeitliche Druckverlauf $P(t)$ ist in der Abb. 8 aufgetragen. Für einen Schüttkörper auf der Basis der für KAB Modell 1 relevanten Größen (Querschnittsfläche $F = 25$ Quadratmeter, Schüttkörperlänge $L = 20$ m, Permeabilität des Schüttkörpers $K = 1 \text{ E-}10$ Quadratmeter, Resthohlraumvolumen der zugehörigen Kammer $V_0 = 5000$ Kubikmeter) beträgt die Zeitkonstante für den Druckabfall: $T = 1.7 \text{ h}$

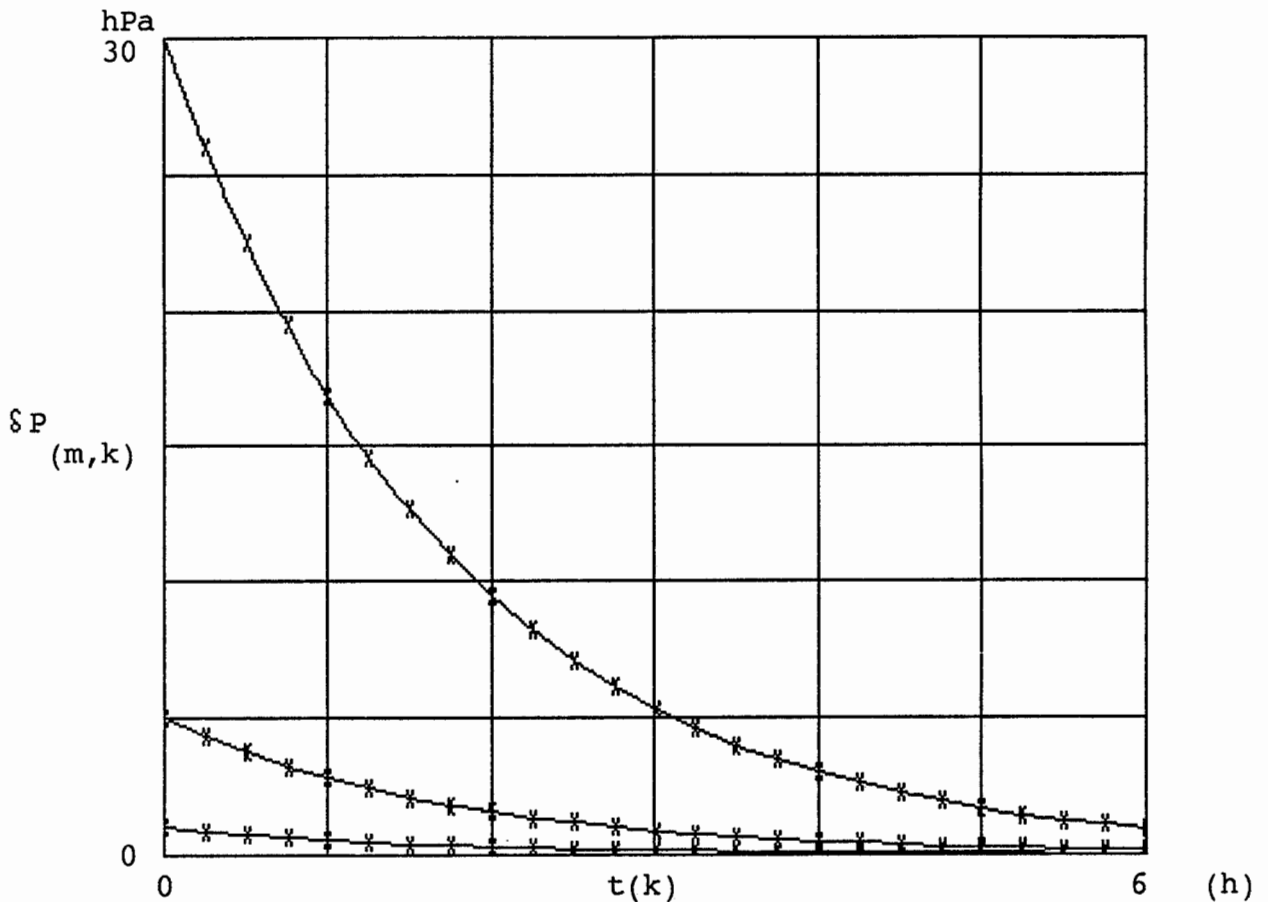


Abb. 8: Zeitliches Abklingen eines Überdrucks in der Einlagerungskammer über einen Schüttkörper (KAB Modell 1) bei anfänglichen Druckbeaufschlagungen
 einer KAB-Länge
 und einem KAB-Querschnitt
 für die Permeabilität

:	$\delta p = 1, 5, 30$	hPa
:	$L = 20$	Meter
:	$F = 25$	Quadratmeter
:	$K = 1\text{E-}10$	Quadratmeter

Nach Abb. 8 ist zu ersehen, daß Luftdruckveränderungen sich relativ rasch - mit der Zeitkonstante von etwa 1.7 h - über den Schüttkörper eines Kammerabschlusses in die Kammer übertragen. Daraus ist weiterhin zu folgern, daß große Luftdruckdifferenzen über den Schüttkörper (wie z.B. 30 hPa) sich gar nicht erst aufbauen können, da atmosphärische Luftdruckschwankungen von dieser Größe sich nicht kurzfristig - sondern über größere Zeiträume von meist einigen Tagen - aufbauen und zwischenzeitlich der Luftdruck hinter dem Schüttkörper der äußeren Luftdruckveränderung mit der Zeitkonstante von etwa 1.7 h bereits gefolgt ist.

Das infolge von Luftdruckschwankungen über den Schüttkörper eines Kammerabschlusses transportierte Luftvolumen läßt sich nach der Zustandsgleichung für ideale Gase berechnen:

$$\delta V = V * \delta p / p \quad (14)$$

Bei einem Luftvolumen V der Kammer von etwa 5000 Kubikmeter und einem Luftdruck p untertage von etwa 1150 hPa beträgt bei einem Druckanstieg die in die Kammer bzw. bei einem Druckabfall die aus der Kammer strömende Luftmenge etwa 5 Kubikmeter pro hPa Druckänderung.

Eigenen Auswertungen der atmosphärischen Luftdruckschwankungen zufolge treten große Luftdruckschwankungen mit Werten um oder über 30 hPa jährlich nur selten auf. Bei solchen Luftdruckschwankungen kommt es dann zu Frischlufteinträgen bzw. zu Kammerluftausträgen von etwa 150 Kubikmetern Volumen. Bei einem Schüttkörper von etwa 20 m Länge und 25 Quadratmeter Querschnitt und einer Porosität von etwa 0.3 hat der Schüttkörper des Kammerabschlußbauwerks allein ein Resthohlraumvolumen von etwa 150 Kubikmetern.

Daraus ist zu ersehen, daß selbst die relativ seltenen großen Luftdruckschwankungen praktisch nur zu einem Luftaustausch innerhalb des Schüttkörpers des Kammerabschlußbauwerks führen. Eine damit verbundene Freisetzung radioaktiver Gase ist deshalb nur auf die langsamen Transportmechanismen (wie Diffusion, Gasbildung innerhalb der Kammer, Temperaturgradient und Gebirgskonvergenz) aus dem Kammerinneren in den KAB-Schüttkörper zurückzuführen.

2.2 Modell und Parameter für die Aktivitätsflußanalyse

2.2.1 Aktivitätskonzentration radioaktiver Stoffe in der Kammeratmosphäre

Der Aufbau des Aktivitätsinventars in der Kammeratmosphäre AIK einer abgeschlossenen Einlagerungskammer wird bestimmt von dem Gebindeinventar AI, den Freisetzungsfaktoren FF aus den Gebinden, der Luftwechselzahl der Kammeratmosphäre βN , der Abscheidezahl aus der Kammeratmosphäre für Aerosole βA sowie den Zerfallskonstanten λ .

Der aus diesen Einflußparametern resultierende Aktivitätsfluß ist übersichtshalber in der Abb. 9 in Form eines Aktivitätsflußdiagramms dargestellt.

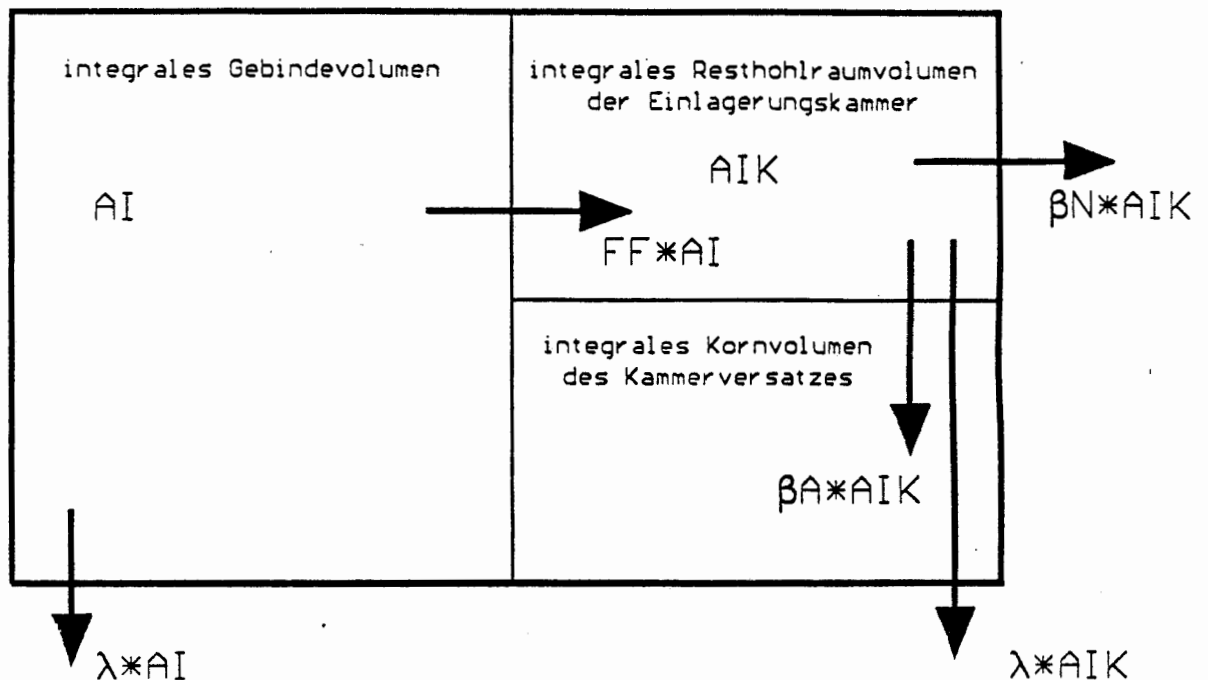


Abb. 9: Aktivitätsflußdiagramm innerhalb und aus einer abgeschlossenen Einlagerungskammer

Die Bilanz für das Aktivitätsinventar innerhalb der Gebinde einer Einlagerungskammer wird durch die Differentialgleichung (DGL) beschrieben:

$$dAI/dt = - \lambda * AI - FF * AI \quad (15)$$

mit AI = nuklidspezifisches Aktivitätsinventar innerhalb der Gebinde einer Einlagerungskammer

dAI/dt = zeitliche Änderung des Aktivitätsinventars

$\lambda \cdot AI$ = Reduktion des Aktivitätsinventars infolge radioaktiven Zerfalls (λ = Zerfallskonstante)

$FF \cdot AI$ = Reduktion des Aktivitätsinventars infolge Aktivitätsfreisetzung aus den Gebinden (FF = Freisetzungsfaktor aus den Gebinden gemäß /GRS 89a/)

Die Lösung dieser DGL in Abhängigkeit von der Zeit T lautet:

$$AI(T) = AI(0) \cdot \exp(-(\lambda + FF) \cdot T) \quad (16)$$

Die Bilanz für das aus den Gebinden in die Kammeratmosphäre freigesetzte und dort zum Zeitpunkt T luftgetragen vorliegende Aktivitätsinventar wird durch die DGL beschrieben:

$$dAIK/dt = FF \cdot AI - \lambda \cdot AIK - \beta_N \cdot AIK - \beta_A \cdot AIK \quad (17)$$

mit AIK = nuklidspezifisches Aktivitätsinventar, das luftgetragen innerhalb der Kammer vorliegt

$dAIK/dt$ = zeitliche Änderung des Aktivitätsinventars

$FF \cdot AI$ = Aktivitätseintrag aus den Gebinden in die Kammeratmosphäre

$\lambda \cdot AIK$ = Reduktion des Aktivitätsinventars infolge radioaktiven Zerfalls

$\beta_N \cdot AIK$ = Reduktion des Aktivitätsinventars infolge Luftaustrag aus der Einlagerungskammer in bewetterte Bereiche (β_N = Luftwechselzahl der Einlagerungskammer)

$\beta_A \cdot AIK$ = Reduktion des Aktivitätsinventars infolge von Abscheideprozessen (β_A = Abscheidezahl aus der Kammeratmosphäre)

Durch Einsetzen der Gleichung (15) in die Gleichung (16) ergibt sich die folgenden DGL:

$$dAIK/dt = FF \cdot AI(0) \cdot \exp(-(\lambda + FF) \cdot T) - (\lambda + \beta_N + \beta_A) \cdot AIK \quad (18)$$

Die Lösung der DGL für das luft/gasgetragene Aktivitätsinventar lautet:

$$AIK(T) = \frac{AI(0) \cdot FF}{(\lambda + \beta_N + \beta_A) - (\lambda + FF)} \cdot (\exp(-(\lambda + \beta_N + \beta_A) \cdot T) - \exp(-(\lambda + FF) \cdot T)) \quad (19)$$

Daraus errechnet sich die von der Kammergröße unabhängige luft/gasgetragene Aktivitätskonzentration $AKZ(T)$ nach der Relation:

$$AKZ(T) = AIK(T) / VK \quad (20)$$

mit VK = Resthohlraumvolumen in der Einlagerungskammer.

Es ist anzumerken, daß in der Lösungsgleichung (19) berücksichtigt wird, daß die zeitliche Änderung des Aktivitätsinventars in den Gebinden von einer anderen Zerfallskonstante (λ_1) und einem anderen Freisetzungsfaktor (FF1) abhängen kann als dies für den zeitlichen Aktivitätsverlauf in der Kammeratmosphäre (λ bzw. FF) der Fall ist. Dies ist für Mutter-/Tochternuklide mit unterschiedlichen Freisetzungs- und Zerfallsverhältnissen von Bedeutung, wie z.B. für die Nuklide Ra226/Rn222. Während der zeitliche Verlauf der Freisetzung aus den Gebinden für Rn222 von λ_1 und FF1 sowie dem Inventar AI(0) des Mutternuklids Ra226 abhängt, werden die Aktivitätsverhältnisse in der Kammeratmosphäre von λ und FF und den gasförmigen Eigenschaften des Nuklids Rn222 bestimmt. Für die übrigen betrachteten Nuklide/Nuklidgruppen gilt $\lambda = \lambda_1$ und $FF = FF_1$.

Bei der Berechnung luftgetragener Aktivitätsinventare in der Kammeratmosphäre stellen Tritium in der chemischen Form HTO und C 14 in der chemischen Form Kohlenstoffdioxid Sonderfälle dar.

Für die in den Einlagerungskammern vorherrschenden Temperaturen von bis zu etwa 55 Grad Celsius liegt die absolute Luftfeuchtigkeit ALF bei Werten bis zu etwa 100 g/Kubikmeter. Bei einer maximalen Aktivitätskonzentration A_{kw} (Bq/Kubikmeter) für Tritium im Restwasser errechnet sich das maximale Aktivitätsinventar in der Kammeratmosphäre des Volumens VK für Tritium in der chemischen Form HTO zu:

$$\text{HTO:} \quad \text{AIK}(T) = A_{kw} * \text{ALF} * \text{VK} * \exp(-\lambda * T) \quad (21)$$

Erfahrungswerte der Asse weisen aus, daß gasförmige C 14-Verbindungen zu ca. 90 % in der chemischen Form Kohlenstoffdioxid vorliegen /GSF 81/. Kohlenstoffdioxid besitzt gegenüber vielen anderen flüchtigen Kohlenstoffverbindungen die Eigenschaft einer starken Wasserlöslichkeit (in neutralen und alkalischen Wässern).

Da im Falle von Schleuderversatz zwecks Reduzierung der Behälterkorrosion ein Alkalisierungsverfahren (Zudosierung basischer Materialien) geplant ist, kann davon ausgegangen werden, daß C 14 in der chemischen Form Kohlenstoffdioxid sich praktisch vollständig im Porenwasser des Schleuderversatzes auflöst und nicht zur Freisetzung aus versetzten Einlagerungskammern beiträgt.

Aufgrund des vorgenannten Sachverhaltes ist es für eine konservative Analyse ausreichend, wenn die Ermittlung der luftgetragenen C 14-Aktivität mit um den Faktor 10 reduzierten Freisetzungsfaktoren für C 14 durchgeführt wird /GRS 89a; GRS 89d/.

Für Aerosole ist gemäß den Ausführungen in Kap. 2.1.2 davon auszugehen, daß sie sich bereits im Stundenbereich nach der Freisetzung aus den Gebinden zum überwiegenden Teil aus dem Luft-/Gasraum versetzter Einlagerungskammern in oder an den umgebenden Materieoberflächen abgelagert haben. Für die Berechnung von luft-/gasgetragener Aerosolkonzentrationen in versetzten und mit Kammerabschlußbauwerken Modell 1 und Modell 2 abgeschlossenen Einlagerungskammern ist somit die getroffene Annahme als konservativ anzusehen, daß Aerosole nach der Freisetzung aus den Gebinden, unter Berücksichtigung zwischenzeitlicher Wiederaufwirbelungen, nach einer Ablagerungszeit von 24 Stunden zu etwa einem Drittel (1/e-ten Teil) noch im luftgetragenen Zustand vorliegen und zum übrigen Teil (etwa zwei Drittel) insbesondere im Kammerversatz fest abgelagert sind. D.h. die mittlere Abscheidezahl für Aerosole wird zu

$$\beta_A = 4.2 \text{ E-02 /h} = 1 \text{ /d} = 365 \text{ /a} \quad (22)$$

angenommen. Dies ist im Zusammenhang mit der zu erwartenden hohen Luftfeuchte in den Einlagerungskammern als besonders konservativ anzusehen.

Nach dem heutigen Planungsstand sind etwa 52 Einlagerungskammern von insgesamt 26 000 m Länge, 40 Quadratmeter Kammerquerschnitt und etwa 50 % Ausnutzungsgrad durch die Abfallgebände sowie primär eine Resthohlraumverfüllung mit Schleuderversatz vorgesehen. Für die Berechnung des luft/gasgetragenen Aktivitätsinventars und der Aktivitätskonzentration in der Kammeratmosphäre wird deshalb für die vorliegende Analyse als typische Einlagerungskammer eine Kammer mit LK = 500 m Länge, FK = 40 Quadratmeter Querschnittsfläche und VK = 5000 Kubikmeter Resthohlraumvolumen ausgewählt.

Die Hauptantriebskraft für luftgetragene Aktivitätsfreisetzungen aus Kammern, die mit einem KAB Modell 1 abgeschlossen sind, wird durch die Schwankungen des atmosphärischen Luftdrucks (im Zusammenhang mit den anderen Prozessen wie z.B. Gebirgskonvergenz, Gaserzeugung innerhalb der Einlagerungskammer, Temperaturgradient zwischen Einlagerungskammer und bewettertem Grubenbereich) gebildet.

Bei einer Luftdruckabsenkung von 10 hPa (10 mbar) wird etwa 1 % der Kammerluft in die bewetterten Grubenbereiche freigesetzt. Da Luftdruckabsenkungen im Bereich von 5 hPa (5 mbar) bis 20 hPa (20 mbar) etwa 60 bis 80 mal im Jahr und zwischenzeitlich zusätzliche (meist kleinere) Druckschwankungen auftreten, wird abdeckend davon ausgegangen, daß das jährlich aus einer abgeschlossenen Kammer freigesetzte Luft-/Gasvolumen etwa dem doppelten Resthohlraumvolumen der Einlagerungskammer entspricht, d.h. die mittlere Luftwechselzahl einer mit einem KAB Modell 1 abgeschlossenen Einlagerungskammer beträgt

$$\beta_N = 2.28 \text{ E-04 /h} = 5.48 \text{ E-03 /d} = 2 \text{ /a.} \quad (23)$$

Bei dem Resthohlraumvolumen der Kammer von 5000 Kubikmetern bedeutet dies einen Luftaustrag aus einer Einlagerungskammer mit KAB Modell 1 von 10000 Kubikmetern pro Jahr.

Der Luftaustausch von Einlagerungskammern mit KAB Modell 2 ist gegenüber demjenigen von Einlagerungskammern mit KAB Modell 1 stark reduziert. Dies ist dadurch bedingt /AGK 89b; SIM 89/, daß

- die Permeabilität des KAB und des streckennahen Bereichs höchstens $1.0 \cdot 10^{-14}$ Quadratmeter beträgt und demzufolge äußere Luftdruckschwankungen praktisch nicht mehr auf das Kammerinnere übergreifen, was in Form eines experimentellen Qualifikationsnachweises vor Einlagerungsbeginn sicherzustellen ist
- die ausgewählte Kammerlage einen Zeitraum der KAB-Funktionsfähigkeit von mindestens 40 Jahren erwarten läßt
- die Gebirgskonvergenz infolge Kammerlage und Ausbau des streckennahen Bereichs äußerst gering ist
- die Gasbildungsrate der Abfallgebinde infolge Auswahl der einlagerbaren Gebinde gering ist (bis zu etwa 1 ml pro Kubikmeter Abfallgebinde und Stunde im Kammermittel). Für ein geplantes Abfallgebindevolumen von 10 000 Kubikmeter pro Einlagerungskammer mittlerer Größe kommt es infolge der vorgenannten Begrenzung für die spezifische Gasbildungsrate zu einem Gasanfall von weniger als 88 Kubikmeter pro Jahr.

Für den Luftaustrag aus Einlagerungskammern mit KAB Modell 2 kann deshalb von einer normalbetrieblichen Luft-/Gaswechselzahl

$$\beta N = 0.02/a \quad (24)$$

ausgegangen werden. Bei dem vorgenannten Resthohlraumvolumen der Kammer von etwa 5000 Kubikmetern bedeutet dies einen Luft-/Gasaustrag aus einer Einlagerungskammer mit KAB Modell 2 von etwa 100 Kubikmeter pro Jahr.

Mit Hilfe der auf der Basis von ausgewerteten experimentellen und theoretischen Daten ermittelten Freisetzungsfaktoren FF aus den Gebinden /GRS 89 a/ und obigen Gleichungen und Randbedingungen (19) bis (24) werden die nuklidspezifischen Aktivitätskonzentrationen luftgetragener radioaktiver Stoffe aus den einlagerbaren Aktivitätsinventaren getrennt für Kammern mit KAB Modell 1 und KAB Modell 2 berechnet (siehe Kap. 2.3.3 und Kap. 2.4.3).

2.2.2 Normalbetriebliche Aktivitätsableitungen

Normalbetriebliche Aktivitätsableitungen aus versetzten Einlagerungskammern, die mit Kammerabschlußbauwerken Modell 1 bzw. Modell 2 verschlossen sind, lassen sich auf der Basis der in Kap. 2.2.1 abgeleiteten Gleichungen und Randbedingungen nach der folgenden Relation berechnen:

$$AFN = AKZ * VK * \beta N * DFKAB \quad (25)$$

mit AFN = normalbetriebliche Aktivitätsableitung aus einer abgeschlossenen Einlagerungskammer (Bq/a)

AKZ = Aktivitätskonzentration radioaktiver Stoffe in der Kammeratmosphäre (Bq/Kubikmeter)

VK = Resthohlraumvolumen der Einlagerungskammer (Kubikmeter)

βN = Luft-/Gaswechselzahl aus der Einlagerungskammer (1/a)

DFKAB = nuklidspezifische Durchlässigkeitsfaktoren für Kammerabschlußbauwerke,

Wertebereich für DFKAB: 0 bis 1,

DFKAB = 0: Es findet eine praktisch vollständige Aktivitätsrückhaltung oder -abschwächung beim Durchtritt durch den KAB-Bereich statt, wie es z.B. für Aerosole der Fall ist.)

DFKAB = 1: Es findet keine Aktivitätsrückhaltung oder -abschwächung beim Durchtritt durch den KAB-Bereich statt, wie es z.B. für inerte und langlebige radioaktive Gase der Fall ist.

Auf die Aerosolrückhaltung und die zeitliche Verzögerung der Aktivitätsableitungen für das KAB Modell 1 wurde bereits in Kap. 2.1 eingegangen. Eine weitergehende Betrachtung zur Rückhaltung und Verzögerung für KAB Modell 1 und KAB Modell 2 ist in den Kapiteln 2.3 und 2.4 enthalten.

2.3 Ergebnisse für Einlagerungskammern mit KAB Modell 1

2.3.1 Anforderungsprofil für das KAB Modell 1

Aus radiologischer Sicht hat ein Kammerabschluß mit dem KAB Modell 1 die folgenden Zielsetzungen:

- Rückhaltung radioaktiver Aerosole
- Reduzierung von Rn 222-Ableitungen

In der Konzept und Systembeschreibung für das Kammerabschlußbauwerk Modell 1 /AGK 89a/ werden die Auslegungsbedingungen spezifiziert, mit denen die radiologische Zielsetzung zu erreichen ist. Die auslegungsgemäßen Anforderungen an ein Kammerabschlußbauwerk Modell 1 sind:

- | | |
|---|--------------------------------|
| - Permeabilität des Schüttkörpers: | 1 E-10 bis 1 E-13 Quadratmeter |
| - Korngrößenbereich des Schüttkörpermaterials: | 0 bis 40 mm |
| - mittlerer Korndurchmesser (d50-Wert): | 2 mm |
| - Mindestlänge des Schüttkörpers im Firstbereich: | 20 m |
| - Mindestlänge der Firstanbindung: | 1 m |
| - Mindestzeitraum der KAB-Funktionsfähigkeit: | 40 a |

Betriebliche Funktionsbeeinträchtigungen der KAB-Barrierewirkung werden integral durch die Strahlenschutzinstrumentierung der Abwetterüberwachung registriert und im Kammerzugangsbereich durch die innerbetriebliche Strahlenschutzüberwachung infolge

- Ortsdosisleistungs(ODL)-Messungen
- Wischtest-Probenentnahmen
- Luftprobensammlungen

lokalisiert /AGK 89a/.

Die Wiederherstellung der auslegungsgemäßen KAB-Barrierewirkung /AGK 89a/ erfolgt dann je nach Art und dem Grad der Funktionsbeeinträchtigung durch

- Nachverdichtung des Schüttkörpers im Bereich der Firstaufweitung mit oder ohne zusätzlichen Materialeintrag oder
- Versiegelungen des streckennahen Bereichs (SNB) z.B. durch Spritzmörtelauftrag oder
- Abdichtung des streckennahen Bereichs (SNB) durch mehrstufige Dichtungsinjektionen mit versuchserprobten Injektionsmitteln oder
- Errichtung eines zusätzlichen Schüttkörpers bzw. Verlängerung des vorhandenen Schüttkörpers ggf. mit einer zusätzlichen Firstaufweitung.

2.3.2 Kriterien für einlagerbare Gebinde und Kammeraktivitätsinventare

Für die in Kammern mit KAB Modell 1 einlagerbaren Gebinde und den daraus resultierenden Kammeraktivitätsinventaren gibt es die drei begrenzenden Aspekte:

- Wasserstoff-Bildungsraten (ml/Kubikmeter*Stunde)
- Betriebliche Aktivitätsgrenzwerte (Bq/Meter)
- Gesamtaktivitätsinventare des Endlagers (Bq)

Um zündfähige Wasserstoff/Luft-Gemische zu vermeiden, wurde unter Berücksichtigung der Prozesse für den Gasabtransport

- Atmosphärische Luftdruckschwankungen
- Diffusion
- Austreibung durch Erwärmung eingeströmter Luft
- Konvergenz des Deckgebirges
- Austreibung durch Gasbildung innerhalb der Einlagerungskammer

eine maximale Wasserstoffbildungsrate pro Bruttovolumen des Abfalls und Stunde von etwa 5.2 ml/Kubikmeter*Stunde im Kammermittel als obere Begrenzung der einlagerbaren Gebinde für diesen Kammertyp ermittelt /GRS 89b/.

Für die betrieblichen Aktivitätsgrenzwerte wurde das Berechnungsverfahren dargestellt /GRS 89c/ und die Ergebnisse auf der Basis typischer Einlagerungsverhältnisse bestimmt /GRS 89d/. Diese betrieblichen Aktivitätsgrenzwerte sind für ausgewählte Radionuklide und Radionuklidgruppen in der Tabelle 4 zusammengestellt. Zur Vollständigkeit der Angaben sind in der Tabelle 4 auch die auf der Basis von ausgewählten experimentellen und theoretischen Daten ermittelten nuklidspezifischen Freisetzungsfaktoren aus den Gebinden /GRS 89a/ aufgeführt.

Tabelle 4: Betriebliche Aktivitätsgrenzwerte und Freisetzungsfaktoren aus den Abfallgebinden gemäß /GRS 89a; GRS 89d/

Radionuklid/ Radionuklidgruppe	Gebinde-Freiset- zungsfaktoren (1/a)	Betriebliche Aktivitätsgrenzwerte (Bq/m) für Behälterdichtigkeiten
		DF=1 DF=0.01
H 3 (unspez.)	5 E-02 (HT)*	1.6 E+10 2.4 E+10
H 3 (HT, Met. Fest.)	5 E-04 (HT)	2.6 E+12 3.0 E+12
H 3 (HTO)	5 E-02 (HTO)	9.2 E+10 9.2 E+12
C 14 (flüchtig)	5 E-03 **	1.9 E+09 3.3 E+09
C 14 (Met. Fest.)	1 E-07 **	8.9 E+13 1.5 E+14
Rn222(unfixiert)	5.3 E+01	2.3 E+07 *** 1.2 E+11 ***
Rn222(fixiert)	3.3 E 00	3.7 E+08 *** 1.2 E+11 ***
I129 (unspez.)	1.0 E-04	4.7 E+07 4.7 E+09
β/Γ-Strahler(F>1%)	5 E-10	9.5 E+13 9.5 E+15
β/Γ-Strahler(F<1%)	5 E-12	9.5 E+15 9.5 E+17
α-Strahler	5 E-12	4.7 E+14 4.7 E+16

* = Freisetzungsfaktor für den HT-förmigen Anteil

** = reduzierte Werte (siehe Kap. 2.2)

*** = betriebliche Grenzwerte für das Mutternuklid Ra226

F = Massenanteil der Restfeuchte im Abfallprodukt

Neben den betrieblichen Aktivitätsgrenzwerten, die aus Aktivitätsflußanalysen resultieren, sind nach den Endlagerungsbedingungen zusätzliche Begrenzungen vorgegeben, die auch den übrigen Analysenbereichen (thermische Beeinflussung des Wirtsgesteins, Vermeidung von Kritikalität und Langzeitsicherheit) Rechnung tragen. Diese Begrenzungen für die Aktivitätsinventare des gesamten Endlagers am Ende der Betriebszeit sind für die in der vorliegenden Analyse ausgewählten Radionuklide und Radionuklidgruppen in der Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5: Gesamtinventare am Ende der Betriebsphase des Endlagers Konrad nach den Endlagerungsbedingungen /PTB 89a/

Radionuklid/ Radionuklidgruppe	Gesamtinventar des Endlagers (Bq)
H 3	6.0 E+17
C 14	4.0 E+14
Ra226	4.0 E+12
I 129	7.0 E+11
β/Γ-Strahler	5.0 E+18
α-Strahler	1.5 E+17

Die anfänglichen Gesamtinventare AI(0) der Gebinde in einer Einlagerungskammer lassen sich aus den meterbezogenen betrieblichen Aktivitätsbegrenzungen AIM(0) nach Tabelle 4 und der Kammerlänge LK in einfacher Weise berechnen:

$$AI(0) = AIM(0) * LK \quad (26)$$

Nach den Gleichungen (16) und (26) gilt dann für die Gesamtinventare der Gebinde in einer Einlagerungskammer in Abhängigkeit von der Standzeit T:

$$AI(T) = AIM(0) * LK * EXP(-(\lambda_1 + FF_1) * T) \quad (27)$$

Bei der Berechnung der nuklidspezifischen Gebindeinventare einer Einlagerungskammer wurden die Begrenzungen nach Tabelle 5 zusätzlich berücksichtigt, wenn nach der Gleichung (26) mehr als 10 % des für das gesamte Endlager jeweils zulässigen Aktivitätsinventars in einer einzigen Einlagerungskammer einlagerbar wäre. D.h. in diesen Fällen wurde das nuklidspezifische Gebindeinventar beispielhaft auf 10 % des für das gesamte Endlager jeweils zulässigen Aktivitätsinventars begrenzt. Bei den insgesamt 52 vorgesehenen Einlagerungskammern im Endlager Konrad bedeutet diese Vorgehensweise, daß in einer einzelnen Einlagerungskammer Aktivitätsinventare als eingelagert unterstellt wurden, die um einen Faktor von bis zu 5.2 über dem mittleren Aktivitätsinventar pro Kammer liegen. Dies unterstreicht die Konservativität dieser auslegungsgemäßen Vorgehensweise, so daß sich im Zusammenhang mit den daraus abgeleiteten Analysenergebnissen keine zusätzlichen Anforderungen an das Einlagerungsszenario ableiten lassen.

Die Aktivitätsinventare der Gebinde, die nach der Gleichung (27) mit den vorgenannten Einschränkungen für eine typische Einlagerungskammer (Kammerlänge LK = 500 m) berechnet wurden, sind in der Tabelle 6 für verschiedene Behälterdichtigkeiten zusammengestellt.

Tabelle 6: Nuklidspezifische Aktivitätsinventare der Gebinde in einer Einlagerungskammer mit KAB Modell 1 direkt nach Kammerabschluß auf der Basis betrieblicher Aktivitätsgrenzwerte für Abfallbehälter ohne bzw. mit spezifizierter Dichtigkeit

Nuklidspezifische Gebindeinventare einer Einlagerungskammer direkt nach Kammerabschluß (Bq/Kammer)

Behälterdurchlässigkeitsfaktor	DF = 1	DF = 0.01
H 3 (unspez.)	8.0 E+12	1.2 E+13
H 3 (HT, Met.F.)	1.3 E+15	1.5 E+15
H 3 (HTO)	4.6 E+13	4.6 E+15
C 14 (flücht.)	9.5 E+11	1.7 E+12
C 14 (Met.F)	4.0 E+13	4.0 E+13
Ra226 (unfix.)	1.2 E+10	4.0 E+11
Ra226 (fix.)	1.9 E+11	4.0 E+11
I129 (unspez.)	2.4 E+10	7.0 E+10
β/Γ-Strahler(F>1%)	4.8 E+16	5.0 E+17
β/Γ-Strahler(F<1%)	5.0 E+17	5.0 E+17
α-Strahler	1.5 E+16	1.5 E+16

F = Massenanteil der Restfeuchte im Abfallprodukt

2.3.3 Aktivitätskonzentration radioaktiver Stoffe in der Kammeratmosphäre

Die nuklidspezifischen Aktivitätskonzentrationen in der Atmosphäre einer abgeschlossenen Einlagerungskammer in Abhängigkeit von der Kammerstandzeit T sind für radioaktive Stoffe (ohne $H\ 3$ in der chemischen Form HTO) nach den Gleichungen (19) und (20) und für Tritium in der chemischen Form HTO nach den Gleichungen (21) und (20) quantifizierbar.

Mit den folgenden Eingangsparametern und Randbedingungen wurden die nuklidspezifischen Aktivitätskonzentrationswerte berechnet:

- Gebindeinventare $AI(0)$ nach Tabelle 6
- Gebinde-Freisetzungsfaktoren FF bzw. $FF1$ nach Tabelle 4
- Luftwechselzahl für radioaktive Gase $\beta N = 2 /a$ für Kammern mit KAB Modell 1 (siehe Kap. 2.2)
- Abscheidezahl für radioaktive Aerosole $\beta A = 1 /d = 365 /a$ (siehe Kap. 2.2)
- Resthohlraumvolumen einer typischen Einlagerungskammer $VK = 5000$ Kubikmeter (siehe Kap. 2.2)
- absolute Luftfeuchtigkeit $ALF = 100$ g/Kubikmeter für Temperaturen bis etwa 55 Grad Celsius (siehe Kap. 2.2)
- maximale Aktivitätskonzentration für Tritium im Restwasser der Abfallgebinde, die in Kammern mit KAB Modell 1 eingelagert werden:
 $AKw = 5 E+11$ Bq/Kubikmeter gemäß /GRS 89d/
- Berücksichtigung der Löslichkeit von $C\ 14$ in der chemischen Form Kohlenstoffdioxid im Porenwasser des alkalisierten Schleuderversatzes (siehe Kap. 2.2).

Die auf die vorgenannte Weise ermittelten Berechnungswerte der nuklidspezifischen Aktivitätskonzentration in der Atmosphäre abgeschlossener Kammern sind in der Tabelle 7 zusammengestellt. Diese von der Kammergröße unabhängigen Konzentrationswerte bilden die Ausgangsbasis für weitergehende normalbetriebliche wie auch störungsbedingte Aktivitätsfreisetzungsbetrachtungen für Einlagerungskammern mit KAB Modell 1.

Tabelle 7: Aktivitätskonzentration (Bq/Kubikmeter) luftgetragener radioaktiver Stoffe in Einlagerungskammern, die mit einem KAB Modell 1 abgeschlossen sind, für Behälter ohne bzw. mit spezifizierter Dichtigkeit und Kammerstandzeiten von T = 1a und T = 40a

Behälterdurchlässigkeitsfaktor: Kammerstandzeit:	DF = 1 T = 1a	DF = 0.01 T = 1a	DF = 1 T = 40a	DF = 0.01 T = 40a
H 3 (unspez.,HT)*	3.2 E+07	4.7 E+07	5.9 E+05	8.8 E+05
H 3 (HT,Met.Fest.)	5.3 E+07	6.1 E+07	6.7 E+06	7.8 E+06
H 3 (HTO)	4.7 E+07	4.7 E+07	5.3 E+06	5.3 E+06
C 14 (flücht.)	4.1 E+05	7.1 E+05	3.9 E+05	6.7 E+05
C 14 (Met.Fest.)	3.5 E+02	3.5 E+02	4.0 E+02	4.0 E+02
Rn222 (unfix.)	1.8 E+06	6.2 E+07	1.8 E+06	6.1 E+07
Rn222 (fix.)	1.8 E+06	3.9 E+06	1.8 E+06	3.8 E+06
I129 (unspez.)	1.3 E 00	3.8 E 00	1.3 E 00	3.8 E 00
β/Γ-Aerosole(F>1%)	1.3 E+01	1.4 E+02	1.3 E+01	1.4 E+02
β/Γ-Aerosole(F<1%)	1.4 E 00	1.4 E 00	1.4 E 00	1.4 E 00
α-Aerosole	4.1 E-02	4.1 E-02	4.1 E-02	4.1 E-02

F = Massenanteil der Restfeuchte im Abfallprodukt

* H 3 (unspez.,HT) bedeutet, daß diese Zeile die HT-förmigen Anteile der Tritiumkonzentration enthält. Die Gesamtkonzentration für Tritium in unspezifizierter chemischer Form (H 3 (unspez.)) ist die Summe aus der Aktivitätskonzentration für H 3 (unspez.,HT) und H 3 (HTO) nach den Zeilen 1 und 3 dieser Tabelle. Diese Aufteilung wurde aus Gründen der Nachvollziehbarkeit wegen der unterschiedlichen Berechnung dieser beiden Anteile gewählt.

2.3.4 Normalbetriebliche Aktivitätsableitungen

Die normalbetrieblichen Aktivitätsableitungen können nach der Gleichung (25) auf der Basis der ermittelten Aktivitätskonzentrationen in der Kammeratmosphäre und den spezifizierten Werten für die normalbetriebliche Luftwechselzahl $\beta N = 2 / a$ für ein mittleres Resthohlraumvolumen $VK = 5000$ Kubikmeter bestimmt werden. Für eine Quantifizierung der normalbetrieblichen Aktivitätsfreisetzungen aus abgeschlossenen Einlagerungskammern sind lediglich noch Festlegungen für den wirksamen KAB-Durchtrittsfaktor $DFKAB$ erforderlich.

Wie in den Kap. 2.1.2 und 2.1.3 ausgeführt, kommt es für normalbetriebliche Freisetzungen aus der Kammer zu einer praktisch vollständigen Aerosolabscheidung spätestens im Schüttkörper eines KAB Modell 1 und zu signifikanten Verzögerungen für radioaktive Gase, da diese praktisch nur auf die langsamen Transportmechanismen aus dem Kammerinneren in den KAB-Schüttkörper zurückzuführen sind. Speziell für $Rn222$ kann die Freisetzung aus einer abgeschlossenen Kammer praktisch vollständig vermieden werden, wenn die wenigen Abfälle, aus denen $Rn222$ freigesetzt werden kann, bevorzugt in Kammerbereichen eingelagert werden, die weiter vom KAB entfernt sind.

Dies gilt auch für den Zeitraum, in dem bis zum Ausgleich durch die nachfolgende Gebirgskonvergenz die Firstanbindung bis auf eine Länge von mindestens 1 m im Bereich der Firstschikane durch Setzungsvorgänge reduziert ist.

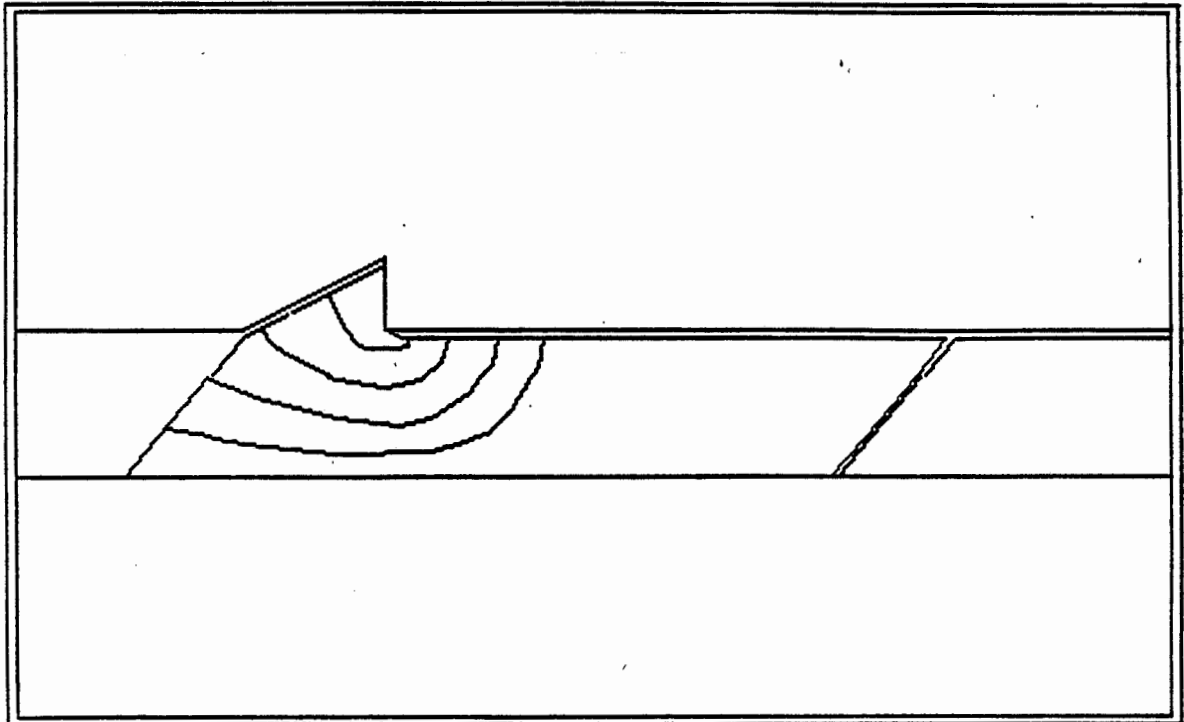


Abbildung 10: Skizze des KAB-Querschnitts und der Strömungslinien für den Fall der zeitlich reduzierten Firstanbindung

Wie aus der Skizze nach Abb. 10 ersichtlich ist, gilt für den Fall der zeitlich reduzierten Firstanbindung - unter zusätzlicher Berücksichtigung des zur Strömungslänge proportionalen Strömungswiderstands -, daß für die Durchströmung des KAB die wirksame Querschnittsfläche ungefähr gleich bleibt und die wirksame Strömungslänge etwa 4 m beträgt.

Berechnungen nach den Gleichungen (7) bis (11) des Kap. 2.1.2 haben zum Ergebnis, daß Schüttkörper aus Konradhaufwerk mit Schüttkörperlängen im Bereich von 1m bis 4m bereits ausreichend sind, um eine praktisch vollständige Aerosolrückhaltung zu gewährleisten. Eine ausreichende Verzögerung zur Vermeidung von Rn222-Freisetzungen kann - wie oben beschrieben - bereits durch eine geeignete Einlagerung der wenigen dafür in Frage kommenden Abfallgebinde gewährleistet werden.

Bei der Berechnung der normalbetrieblichen Aktivitätsfreisetzungen aus Einlagerungskammern, die mit einem KAB Modell 1 abgeschlossen sind, kann deshalb von folgenden effektiven Faktoren $DF_{KAB} = 0$ für radioaktive Aerosole sowie für Rn222 und $DF_{KAB} = 1$ für die restlichen radioaktiven Gase ausgegangen werden.

Die nach der Gleichung (25) und den vorgenannten Randbedingungen berechneten jährlichen Aktivitätsfreisetzungen aus einer mit einem KAB Modell 1 verschlossenen Einlagerungskammer sind in der Tabelle 8 zusammengestellt. Daraus ist zu erkennen, daß für Tritium die jährlichen Freisetzungen aus einer abgeschlossenen Kammer für die Kammerstandzeit $T = 1a$ etwa 3 bis 6 % und für die Kammerstandzeit $T = 40 a$ etwa 0.3 bis 0.5 % der Antragswerte für die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Luft ausschöpfen können. Für C 14 beträgt dieser Ausschöpfungsgrad nahezu unabhängig von der Kammerstandzeit 1 bis 2 % bzw. etwa 0.001 %.

Tabelle 8: Normalbetriebliche Aktivitätsfreisetzung (Bq/a) radioaktiver Stoffe aus Einlagerungskammern, die mit einem KAB Modell 1 abgeschlossen sind, für Abfallbehälter ohne bzw. mit spezifizierter Dichtigkeit und Kammerstandzeiten T von 1a und 40a

Behälterdurchlässigkeitsfaktor:	DF = 1	DF = 0.01	DF = 1	DF = 0.01
Kammerstandzeit:	T = 1a	T = 1a	T = 40a	T = 40a
H 3 (unspez.,HT)*	3.2 E+11	4.7 E+11	5.9 E+09	8.8 E+09
H 3 (HT, Met. Fest.)	5.3 E+11	6.1 E+11	6.7 E+10	7.8 E+10
H 3 (HTO)	4.7 E+11	4.7 E+11	5.3 E+10	5.3 E+10
C 14 (flücht.)	4.1 E+09	7.1 E+09	3.9 E+09	6.7 E+09
C 14 (Met. Fest..)	3.5 E+06	3.5 E+06	4.0 E+06	4.0 E+06
Rn222, I 129, β/Γ - und α -Aerosole	---	---	---	---

* Die Tritiumfreisetzung für H 3 (unspez.) ist die Summe von H 3 (unspez.,HT) und H 3 (HTO) (siehe Anmerkung zu Tabelle 7).

2.4 Ergebnisse für Einlagerungskammern mit KAB Modell 2

2.4.1 Anforderungsprofil für das KAB Modell 2

Aus radiologischer Sicht hat ein Kammerabschluß mit dem KAB Modell 2 die folgenden Zielsetzungen:

- Rückhaltung radioaktiver Aerosole
- Reduzierung der H 3-, C 14- und Rn222-Freisetzungen durch quasi-dichten Abschluß.

In der Konzept- und Systembeschreibung für das Kammerabschlußbauwerk Modell 2 /AGK 89b/ werden die Auslegungsbedingungen spezifiziert, mit denen die radiologische Zielsetzung zu erreichen ist. Die auslegungsgemäßen Anforderungen an ein Kammerabschlußbauwerk Modell 2 sind:

- Permeabilität des Kammerabschlußbauwerks (KAB) $K(KAB) \leq 1 \text{ E-14 Quadratmeter}$
- Permeabilität des strecken-nahen Bereichs (SNB) $K(SNB) \leq 1 \text{ E-14 Quadratmeter}$
- Auslegungsdruck des KAB
 - zwischen Einlagerungskammer und bewetterter Strecke $P_i = 1 \text{ E+05 Pa (1 bar)}$
 - zwischen bewetterter Strecke und Einlagerungskammer $P_a = 1 \text{ E+04 Pa (0.1 bar)}$
- Zeitraum der Funktionsfähigkeit $T \geq 40 \text{ Jahre}$

Die durchgeführten Beobachtungen und Messungen haben ergeben, daß sich ein Hohlraum mit den für das Kammerabschlußbauwerk erforderlichen Abmessungen standsicher herstellen läßt. Weiterhin konnte gezeigt werden, daß sich der streckennahe Bereich mit Hilfe von Injektionen auf das anforderungsgemäße Maß abdichten läßt. Darüber hinaus wurden die im Gebirge und im Ausbau gemessenen Spannungen mit Hilfe der Finite-Element-Methode nachvollzogen und die Standsicherheit nachgewiesen /AGK 89b/.

Im Rahmen eines Qualifizierungsprogramms wird vor dem Einlagerungsbetrieb die integrale Kammerdichtigkeit experimentell überprüft und die Einhaltung der Permeabilitätsanforderungen sichergestellt /AGK 89b; SIM 89/.

2.4.2 Kriterien für einlagerbare Gebinde und Kammeraktivitätsinventare

Die Einlagerung von Abfallgebinden in Kammern mit einem Abschlußbauwerk von erhöhter Dichtigkeit (KAB Modell 2) ist insbesondere für Abfälle von Bedeutung, die Aktivitätsinventare an Tritium in der chemischen Form HTO mit erhöhten Konzentrationen enthalten. Bedingt durch die physikalische Gegebenheit, daß die Aktivitätskonzentration von HTO in der Kammeratmosphäre begrenzt ist durch

- die maximale absolute Luftfeuchtigkeit und
- die maximale HTO-Konzentration im Restwasser bzw. in der Restfeuchte der Abfallgebinde,

kommt es infolge einer stark reduzierten Luftwechselzahl von Kammern mit KAB Modell 2 auch zu einer starken Reduktion der Tritiumfreisetzung aus abgeschlossenen Kammern.

Dagegen kommt es für andere langlebige und physikalisch-chemisch inerte radioaktive Gase infolge einer stark reduzierten Luftwechselzahl im Falle des KAB Modell 2 zu einem starken zeitlichen Anstieg der Aktivitätskonzentrationen in der Kammeratmosphäre, so daß die Aktivitätsfreisetzungen dieser Radionuklide aus abgeschlossenen Kammern wohl zeitlich verzögert, aber für Betriebszeiten von bis zu 40 Jahren nicht wesentlich reduziert werden. D.h. der Einsatz eines KAB Modell 2 zur Reduktion der Aktivitätsfreisetzung aus abgeschlossenen Kammern ist für diese Kategorie radioaktiver Gase von untergeordneter Bedeutung.

Für kurzlebige radioaktive Gase (z.B. Rn222) und für radioaktive Aerosole ist ein Kammerabschluß mit einem KAB Modell 2 nicht erforderlich (siehe Kap. 2.3). Das gleiche gilt auch wegen der guten Löslichkeit im Porenwasser des alkalisierten Schleuderversatzes für C 14 in der chemischen Form Kohlendioxid (siehe Kap. 2.2).

Unter Beachtung der vorgenannten besonderen Relevanz für HTO-haltige Abfälle gibt es für Kammern mit KAB Modell 2 drei begrenzende Aspekte für die einlagerbaren Gebinde und die daraus resultierenden Kammeraktivitätsinventare:

- Gasbildungsraten (ml/Kubikmeter)
- Betriebliche Aktivitätswerte pro Gebinde (Bq/Gebinde)
- Gesamtaktivitätsinventare des Endlagers (Bq)

Die Einsatzmöglichkeit eines Kammerabschlußbauwerks von erhöhter Dichtigkeit setzt voraus, daß die Gasbildungsrate und die Gebirgskonvergenz in den betreffenden Einlagerungskammern begrenzt werden, um einen starken Druckaufbau in der Einlagerungskammer zu verhindern. Abgesehen von der Erforderlichkeit der Einhaltung der Auslegungsdrücke für das KAB würde bei der Auslegungsporeabilität von 1 E-14 Quadratmeter ein Überdruck von etwa 400 hPa (0.4 bar) ausreichen (siehe Kap. 3.2), um vergleichbare Luft/Gasausträge aus der Einlagerungskammer zu generieren wie sie auch für ein KAB Modell 1 (10 000 Kubikmeter/a) als abdeckend

unterstellt wurden, d.h. die den Aktivitätsfluß reduzierende Wirkung wäre für solche Überdrücke in der Kammer nicht mehr gegeben.

Aus dem vorgenannten Grund ist es für Kammern mit einem KAB Modell 2 erforderlich, daß nur Gebinde mit niedriger Gasbildungsrate (bis zu etwa 1 ml/Kubikmeter*Stunde im Kammermittel) zur Einlagerung kommen. Im Zusammenhang mit der für ein KAB Modell 2 erforderlichen reduzierten Gebirgskonvergenz /AGK 89b/ kann deshalb für eine mittlere Kammer mit einem geplanten Abfallgebinderolumen von 10 000 Kubikmeter von einer jährlichen Luft-/Gasanfallrate von etwa 100 Kubikmeter/a ausgegangen werden (siehe Kap. 2.2).

Auf der Basis dieser jährlichen Luft-/Gasrate wurden bereits begrenzende Aktivitätswerte pro Abfallgebinderolumen für HTO-haltige Abfälle und Tritiumkonzentrationen von maximal 1.1 E+13 Bq HTO/Kubikmeter im Wasser bzw. in der Restfeuchte des Abfallprodukts ermittelt /GRS 89d/. Diese als Richtwerte anzusehenden Aktivitätswerte pro Abfallgebinderolumen sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 9: Aktivitätswerte pro Abfallgebinderolumen mit einer Tritiumkonzentration von bis zu 1.1 E+13 Bq HTO/Kubikmeter im Wasser bzw. in der Restfeuchte des Abfallprodukts für Einlagerungskammern mit KAB Modell 2 gemäß /GRS 89d/

	Aktivitätswerte (Bq/Abfallgebinderolumen) für verschiedene Dichtigkeitspezifikationen der Behälter:				
	ohne DF = 1	/	mit Dichtigkeitspezifikation DF = 0.01 DF = 0.001 DF = 0.0001		
HTO mit weniger als 1 E+10 Bq sonstige Aktivität	1.9 E+10		1.5 E+12	5.8 E+12	8.1 E+12
HTO mit weniger als 1 E+12 Bq sonstige Aktivität	1.5 E+10		8.2 E+10	8.4 E+10	8.6 E+10
HTO mit mehr als 1 E+12 Bq sonstige Aktivität	2.2 E+09		2.9 E+09	2.9 E+09	2.9 E+09

Im Rahmen der vorliegenden Analyse wurden die Aktivitätsinventare pro Einlagerungskammer mit einem KAB Modell 2 folgendermaßen ermittelt:

- Es wurden insgesamt 10000 Gebinde HTO-haltiger Abfälle mit den Aktivitätswerten gemäß Tabelle 9 in einer Kammer als eingelagert angenommen. Alle Fälle der spezifizierten Behälterdichtigkeit abdeckend wurde vereinfachend von dem maximalen HTO-Aktivitätswert für die jeweilige Kategorie der sonstigen Aktivität ausgegangen.
- Für das Kammerinventar der übrigen Radionuklide bzw. Radionuklidgruppen wurde beispielhaft von dem auf das gesamte Endlager bezogenen Durchschnittswert für ein Kammerinventar, d.h. von etwa 2 % des gesamten Endlagerinventars (siehe Tabelle 5) ausgegangen. Da Einlagerungskammern mit einem KAB Modell 2 primär für HTO-haltige Abfälle - wie oben ausgeführt - von besonderer Relevanz sind, wurde damit der Einfluß der sonstigen Aktivitäten im Rahmen dieser Analyse ausreichend abdeckend berücksichtigt.

Die unter diesen Randbedingungen ermittelten Aktivitätsinventare einer typischen Einlagerungskammer mit einem KAB Modell 2 sind in der Tabelle 10 zusammengestellt. Zur Vollständigkeit sind die zugehörigen Freisetzungsfaktoren aus den Gebinden /GRS 89a/ mit aufgeführt.

Tabelle 10: Nuklidspezifisches Aktivitätsinventar einer typischen Einlagerungskammer mit einem KAB Modell 2 direkt nach Kammerabschluß sowie Freisetzungsfaktoren aus den Gebinden

Radionuklid/ Radionuklid- gruppe	Gebinde-Freiset- zungsfaktoren (1/a)	Nuklidspezifisches Aktivitätsinven- tar einer Einlagerungskammer direkt nach Kammerabschluß (Bq/Kammer)
HTO (sonst. Akti- vität <1 E+10 Bq)	5 E-02 (HTO) 1 E-05 (HT)	8.1 E+16
HTO (sonst. Akti- vität <1 E+12 Bq)	5 E-02 (HTO) 1 E-03 (HT)	8.6 E+14
HTO (sonst. Akti- vität >1 E+12 Bq)	5 E-02 (HTO) 5 E-02 (HT)	2.9 E+13
C 14 (flüchtig)	5 E-03 *	8.0 E+12
C 14 (Met.Fest.)	1 E-07 *	8.0 E+12
Ra226	53 (Rn222)	8.0 E+10
I 129 (unspezif.)	1 E-04	1.4 E+10
β/Γ-Strahler (F>1%)	5 E-10	1.0 E+17
β/Γ-Strahler (F<1%)	5 E-12	1.0 E+17
α-Strahler	5 E-12	3.0 E+15

* = reduzierte Werte (siehe Kap. 2.2)

2.4.3 Aktivitätskonzentration radioaktiver Stoffe in der Kammeratmosphäre

Die nuklidspezifischen Aktivitätskonzentrationen in der Atmosphäre einer mit einem KAB Modell 2 abgeschlossenen Einlagerungskammer in Abhängigkeit von der Kammerstandzeit T sind für radioaktive Stoffe (ohne H 3 in der chemischen Form HTO) nach den Gleichungen (19) und (20) und für Tritium in der chemischen Form HTO nach den Gleichungen (21) und (20) quantifizierbar.

Mit den folgenden Eingangsparametern und Randbedingungen wurden die nuklidspezifischen Aktivitätskonzentrationswerte berechnet:

- Gebindeinventare $AI(0)$ der Kammer und Freisetzungsfaktoren FF bzw. FF1 aus den Gebinden nach Tabelle 10
- Luft-/Gasraten aus Kammern mit einem KAB Modell 2 von $\beta_N = 0.02$ /a (siehe Kap. 2.2)
- Abscheidezahl für radioaktive Aerosole $\beta_A = 1$ /d = 365 /a (siehe Kap. 2.2)
- Resthohlraumvolumen einer mittleren Einlagerungskammer $VK = 5000$ Kubikmeter (siehe Kap. 2.2)
- absolute Luftfeuchtigkeit $ALF = 100$ g/Kubikmeter für Temperaturen bis etwa 55 Grad Celsius (siehe Kap. 2.2)
- maximale Aktivitätskonzentration für Tritium im Restwasser der Abfallgebinde, die in Kammern mit einem KAB Modell 2 eingelagert werden: $AKw = 1.1 \text{ E}+13$ Bq/Kubikmeter gemäß /GRS 89a/
- Berücksichtigung der Löslichkeit von C 14 in der chemischen Form Kohlenstoffdioxid im Porenwasser des alkalisierten Schleuderversatzes (siehe Kap. 2.2).

Die auf die vorgenannte Weise ermittelten Berechnungswerte der nuklidspezifischen Aktivitätskonzentration in der Kammeratmosphäre einer mit einem KAB Modell 2 abgeschlossenen Kammer sind in der Tabelle 11 zusammengestellt. Diese von der Kammergröße unabhängigen Konzentrationswerte bilden die Ausgangsbasis für weitergehende normalbetriebliche wie auch störungsbedingte Aktivitätsfreisetzungsbetrachtungen für Einlagerungskammern mit einem KAB Modell 2.

Tabelle 11: Aktivitätskonzentration luftgetragener radioaktiver Stoffe in Einlagerungskammern, die mit einem KAB Modell 2 abgeschlossen sind, für drei verschiedene Kammerstandzeiten

Radionuklid/ Radionuklidgruppe	Aktivitätskonzentration (Bq/Kubikmeter) in der Kammeratmosphäre für die Kammerstandzeiten:		
	T = 1 a	T = 10 a	T = 40
H 3 (HTO)	1.0 E+09	6.3 E+08	1.2 E+08
H 3 (HT) für sonstige Aktivität < 1 E+10 Bq	1.5 E+08	8.4 E+08	4.7 E+08
H 3 (HT) für sonstige Aktivität < 1 E+12 Bq	1.6 E+08	8.8 E+08	4.9 E+08
H 3 (HT) für sonstige Aktivität > 1 E+12 Bq	2.7 E+08	1.2 E+09	3.2 E+08
C 14 (flüchtig)	7.9 E+06	7.1 E+07	2.0 E+08
C 14 (Met.Fest.)	1.6 E+02	1.5 E+03	4.4 E+03
Rn 222 (unfixiert)	1.3 E+07	1.3 E+07	1.3 E+07
J 129 (unspezifiziert)	7.7 E-01	7.7 E-01	7.7 E-01
β/Γ-Aerosole (F > 1 %)	2.7 E+01	2.7 E+01	2.7 E+01
β/Γ-Aerosole (F < 1 %)	2.7 E-01	2.7 E-01	2.7 E-01
α-Aerosole	8.2 E-03	8.2 E-03	8.2 E-03

Nach der Tabelle 11 ist zu ersehen, daß die Aktivitätskonzentration in der Kammeratmosphäre mit steigender Kammerstandzeit T für

- Tritium in der chemischen Form HTO infolge des radioaktiven Zerfalls mit der Halbwertszeit von 12.3 a stetig abfällt
- Tritium in der chemischen Form HT infolge der Freisetzung aus den Gebinden und der erhöhten Kammerdichtigkeit zunächst ansteigt und später primär infolge des radioaktiven Zerfalls wieder abfällt
- C 14 infolge der Freisetzung aus den Gebinden und der erhöhten Kammerdichtigkeit stetig ansteigt, aber der zeitliche Anstieg abnimmt, da die Aktivitätsfreisetzung aus der Kammer mit steigender Aktivitätskonzentration zunimmt
- Rn222 infolge der kurzen Halbwertszeit von 3.8 d kurzfristig (nach etwa 3 bis 4 Halbwertszeiten) sein Maximum erreicht hat und wegen der langen Halbwertszeit von 1600 a des Mutternuklids Ra226 sich praktisch nicht mehr verändert
- I 129 sowie β/Γ- und α-Aerosole wegen des Ablagerungsverhaltens aus der Kammeratmosphäre und der Langlebigkeit der Radionuklide ebenfalls keine Zeitabhängigkeit erkennen läßt.

2.4.4 Normalbetriebliche Aktivitätsableitungen

Die normalbetrieblichen Aktivitätsableitungen aus Einlagerungskammern, die mit einem KAB Modell 2 abgeschlossen sind, können auf der Basis der Aktivitätskonzentrationen (siehe Tabelle 11) nach der Gleichung (25) mit der spezifizierten Luft-/Gasaustrittsrate $\beta N = 0.02 /a$ und dem mittleren Resthohlraumvolumen $VK = 5000$ Kubikmeter (siehe Kap. 2.2) ermittelt werden. Allein wegen der geringen Permeabilität des Kammerabschlusses ist in diesem Fall die praktisch vollständige Rückhaltung für Rn222, I 129 sowie β/Γ - und α -Aerosole sichergestellt, d.h. es kann von den effektiven Faktoren ausgegangen werden:

- DFKAB = 0 für Rn222, I 129 sowie β/Γ - und α -Aerosole
- DFKAB = 1 für die langlebigen radioaktiven Gase

Die unter den vorgenannten Randbedingungen berechneten jährlichen Aktivitätsfreisetzungen aus einer mit einem KAB Modell 2 verschlossenen Einlagerungskammer sind für verschiedene Kammerstandzeiten in der Tabelle 12 zusammengestellt.

Tabelle 12: Normalbetriebliche Aktivitätsfreisetzung radioaktiver Stoffe aus einer Einlagerungskammer, die mit einem KAB Modell 2 abgeschlossen ist, für drei verschiedene Kammerstandzeiten

Radionuklid/ Radionuklidgruppe	Aktivitätsfreisetzung (Bq/a) für die Kammerstandzeiten:		
	T = 1 a	T = 10 a	T = 40 a
H 3 (HTO)	1.0 E+11	6.3 E+10	1.2 E+10
H 3 (HT) für sonstige Aktivität < 1 E+10 Bq	1.5 E+10	8.4 E+10	4.7 E+10
H 3 (HT) für sonstige Aktivität < 1 E+12 Bq	1.6 E+10	8.8 E+10	4.9 E+10
H 3 (HT) für sonstige Aktivität > 1 E+12 Bq	2.7 E+10	1.2 E+11	3.2 E+10
C 14 (flüchtig)	7.9 E+08	7.1 E+09	2.0 E+10
C 14 (Met.Fest.)	1.6 E+04	1.4 E+05	4.4 E+05
Rn 222, J 129, β/Γ - und α -Aerosole	---	---	---

Nach Tabelle 12 ist zu erkennen, daß die jährlichen Freisetzungen einer mit einem KAB Modell 2 abgeschlossenen Kammer die Antragswerte für die Ableitung radioaktiver Stoffe mit der Luft für Tritium (HTO und HT) zu etwa 0.8 % (T = 1a), 1.2 % (T = 10 a) und 0.4 % (T = 40 a) ausschöpfen. Für C 14 (flüchtig) steigt der entsprechende Ausschöpfungsgrad etwa von 0.2 % (T = 1 a) über 1.9 % (T = 10 a) bis zu 5.4 % (T = 40 a) an. Für C 14 (metallische Feststoffe) liegt der Ausschöpfungsgrad um mehr als 4 Größenordnungen darunter.

2.5 Grundaspekte und Konsequenzen für den Einsatz von Pumpversatz anstelle von Schleuderversatz

Als Folge der großvolumigen Gebindeeinlagerung kann es in Einlagerungskammern zu relevanten Wasserstoffbildungsraten kommen. Korrosion von Metallen und Radiolyse sind dafür die wesentlichen Bildungsmechanismen /GRS 89b; IMM 89/.

Zündfähige Wasserstoff-Luft-Gemische liegen prinzipiell dann vor, wenn der Wasserstoffanteil etwa 4 bis 75 Vol.-% und gleichzeitig der Sauerstoffanteil mehr als etwa 5 Vol.-% beträgt.

Bei Wasserstoffanteilen von etwa 4 bis 6 Vol.-% bilden sich im Falle einer Zündung Flammenringe, die sich lediglich aufwärts bewegen und nach Erreichen einer oberen Begrenzung wieder verlöschen. Bei Wasserstoffanteilen von etwa 6 bis 9 Vol.-% wurden neben der Zündrichtung aufwärts auch die Zündrichtungen seitwärts festgestellt. Erst für Wasserstoffanteile im Bereich von etwa 9 bis 75 Vol.-% erfolgt im Falle einer Zündung die Zündausbreitung nach allen Seiten, d.h. auch nach unten. Detonationen, die aus Explosionen aufgrund geometrischer Randbedingungen entstehen können und die mit wesentlich stärkeren mechanischen Auswirkungen verbunden sind, sind im Bereich von Wasserstoffanteilen zwischen etwa 15 und 64 Vol.-% möglich.

Zur Entzündung von Wasserstoff-Luft-Gemische reicht eine Minimalenergie von etwa 0.02 mJ oder $1.25 \cdot 10^{14}$ eV aus. Diese Zündenergie übertrifft die vorliegenden maximalen Strahlungsenergien von etwa $5 \cdot 10^6$ eV um viele Größenordnungen, d.h. eine Entzündung von Wasserstoff-Luft-Gemischen durch radioaktive Strahlung ist nicht gegeben.

Die niedrigsten Selbstentzündungstemperaturen für Wasserstoff-Luft-Gemische wurden bei Temperaturen um etwa 520 Grad C festgestellt. Diese Temperaturen werden in den Einlagerungskammern bei weitem nicht erreicht.

Die Entzündung von Wasserstoff-Luft-Gemischen in versetzten Einlagerungskammern kann durch Schleif- oder Schlagfunken mit Energien bis zu etwa 1 mJ erfolgen. Das Auftreten solcher Funken in Einlagerungskammern, die mit Konrad-Haufwerk versetzt sind, ist unwahrscheinlich, konnte jedoch grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden.

Aufgrund der vorgenannten Wasserstoffproblematik wurde untersucht, welche Wasserstoff-Bildungsraten der Abfallgebinde unter Berücksichtigung von Transportprozessen (siehe Kap. 2.3.2) für Wasserstoff aus abgeschlossenen und versetzten Kammern zulässig sind, um zündfähige Gemische (Anteil an Wasserstoff größer als etwa 4 Vol.-% und gleichzeitig Anteil an Sauerstoff größer als etwa 5 %) zu vermeiden.

Die Diffusion von Wasserstoff in das Gebirge wurde dabei - auf der Basis der bisher vorliegenden Werte der Diffusionskonstante für kompakte Konraderzproben /GSF 89/ und Erkenntnissen aus Vorortmessungen - als Hauptabtransportprozeß aus dem Kammerinneren berücksichtigt.

Diese Untersuchung /GRS 89b/ kam zu dem Ergebnis, daß Wasserstoffbildungs-raten bis zu etwa 5.2 ml pro Kubikmeter Bruttovolumen des Abfalls und Stunde zulässig sind, um das Auftreten von zündfähigen Wasserstoff-Luft-Gemischen zu vermeiden. Für diese Begrenzung erreicht die Wasserstoffkonzentration die untere Zündgrenze von etwa 4 Vol.-% erst, nachdem die Sauerstoffkonzentration den für eine Zündung erforderlichen Wert von 5 Vol.-% bereits unterschritten hat.

Deshalb wurde die Einlagerung in Kammern mit alkalisiertem Schleuderversatz und KAB Modell 1 auf Gebinde begrenzt, deren Wasserstoffbildungs-raten im Kammermittel den Wert von 5.2 ml/Kubikmeter und Stunde nicht überschreiten (siehe Kap. 2.3.2). Für Kammern mit KAB Modell 2, die primär für HTO-haltige Abfälle konzipiert sind, wurde aus anderen Gründen (siehe Kap. 2.4.2) ein noch restriktiverer Wert von etwa 1 ml/Kubikmeter und Stunde im Kammermittel vorgesehen.

Für Gebinde mit größtenteils höheren Wasserstoffbildungs-raten als 5.2 ml pro Kubikmeter und Stunde ist nach dem heutigen Kenntnisstand die Einlagerung in Kammern mit Pumpversatz vorgesehen.

Während beim Schleuderversatz Sackungen unter der Firste und unverfüllte Zwickelhohlräume zwischen den Gebinden grundsätzlich nicht vermeidbar sind, ist bei Pumpversatz die praktisch vollständige Ausfüllung von Resthohlräumen und Zwickeln als Folge des ausgezeichneten Fließverhaltens /PAM 89/ gegeben. Damit ist durch den Einsatz von Pumpversatz eine Minimierung von Resthohlräumen in versetzten Kammern gegeben. Da die Energiedichte von potentiellen Wasserstoffexplosionen hohlraumabhängig ist, wird eine solche Hohlraumminimierung für Abfälle mit hohen Wasserstoffbildungs-raten vorgesehen.

Der geplante Einsatz von Pumpversatz für Abfälle, die mit erhöhten Wasserstoffbildungs-raten verknüpft sein können, ist also nicht auf die radiologische Notwendigkeit, sondern allein auf die Wasserstoffproblematik zurückzuführen. Alkalisierter Schleuderversatz ist aus radiologischer Sicht ein geeignetes Versatzmittel, um eine Minimierung im Hinblick auf Aktivitätsfluß und radiologischen Arbeitsschutz zu gewährleisten.

Im Vergleich zum Schleuderversatz wird durch Pumpversatz eine lokal dichtere Umschließung der Abfallgebände bewirkt. Bedingungen für Ribildung im Pumpversatz sind jedoch infolge von Gebirgskonvergenz und inneren Spannungsphänomenen gegeben, so daß integral nicht von einer starken Dichtigkeitserhöhung für radioaktive Gase auszugehen ist.

Infolge des hohen Verfüllungsgrades von Pumpversatz wird das Resthohlraumvolumen innerhalb einer versetzten Kammer stark reduziert. Das verbleibende geringe Resthohlraumvolumen beschränkt sich im wesentlichen auf kleine Resthohlräume innerhalb der Gebinde sowie auf kleine Rib- oder Resthohlräume im Pumpversatz und streckennahen Bereich.

Das reduzierte und auf z.T. nicht zusammenhängende Teilvolumina aufgeteilte Resthohlraumvolumen einer versetzten Kammer hat zur Folge, daß der Durchgriff von Luftdruckschwankungen in seiner Wirkung als Antriebs-

kraft für Aktivitätsfreisetzungen aus der Kammeratmosphäre praktisch bedeutungslos geworden ist, weil durch die erhöhte Gasbildungsrate der Abfälle die Hauptantriebskraft für gasförmige Aktivitätsfreisetzungen gegeben ist.

Bei dem Abfallbruttovolumen von 10000 Kubikmeter einer mittleren Kammer kommt es bereits bei einer durchschnittlichen Gasbildungsrate von 5.2 ml pro Kubikmeter und Stunde (unterste Gasbildungsrate für den Einsatz von Pumpversatz) zu Gasfreisetzungen aus der Kammer von etwa 460 Kubikmeter pro Jahr. Zu der Luft-/Gasfreisetzung von 10000 Kubikmetern pro Jahr, von der im Falle von Kammern mit Schleuderversatz und KAB Modell 1 ausgegangen wurde (siehe Kap. 2.2), kommt es im Falle von Kammern mit Pumpversatz bei durchschnittlichen Gasbildungsraten der Abfälle von etwa 114 ml pro Kubikmeter und Stunde.

Auf der Basis der vorgenannten Verhältnisse für Kammern mit Pumpversatz (verringertes Resthohlraumvolumen, lokal erhöhte Abfallabdichtung, Rißbildungsmöglichkeiten, erhöhte Gasproduktion der Abfälle, veränderte Luft-/Gasfreisetzung aus versetzten Kammern) kann für den Aktivitätsfluß im Vergleich zu Kammern mit Schleuderversatz und KAB Modell 1 festgestellt werden, daß durch den Einsatz von ~~S~~Pumpversatz

- die Aktivitätsfreisetzung für langlebige chemisch inerte radioaktive Gase sich praktisch nicht verändert
- die Rückhaltung von C 14 in der chemischen Form Kohlenstoffdioxid im Porenwasser des Pumpversatzes (pH-Wert etwa 11 bis 12) ebenso gegeben ist wie im alkalisierten Schleuderversatz
- die Aktivitätsfreisetzung von Tritium in der chemischen Form HTO für Gasbildungsraten im Kammermittel bis zu Werten über 100 ml/Kubikmeter und Stunde sich nicht erhöht
- eine graduelle Fixierung der Abfälle gegeben ist, wodurch einer möglichen Erhöhung der Aktivitätsfreisetzung von Rn222 und anderer kurzlebiger radioaktiver Gase aus der versetzten Kammer entgegengewirkt wird.
- vergleichbar gute Voraussetzungen für das Ablagerungsverhalten aerosolförmiger Stoffe an den für die Freisetzung erforderlichen großflächigen Rißwandungen gegeben sind wie im Falle von Schleuderversatz in Verbindung mit KAB Modell 1

Weiterhin ist für den Einsatzfall von Pumpversatz festzustellen, daß sich für solche Kammern Abschlußbauwerke Modell 1 erübrigen. Diese können durch einen mit Pumpversatz gefüllten Kammerabschnitt, der direkt an die zuletzt eingelagerten Abfälle angrenzt, von etwa 5 m Länge ersetzt werden. Dieses geänderte KAB mit dem zugehörigen streckennahen Bereich kann im betrieblichen Anforderungsfall z.B. durch Injektionsmaßnahmen, wie sie bereits für das KAB Modell 2 erprobt wurden, auf dem erforderlichen Dichtigkeitsgrad gehalten werden.

Auch für den radiologischen Arbeitsschutz ist übergreifend festzustellen, daß im Falle von Pumpversatz das Versetzen deutlich größerer Versatzabschnitte (z.B. von 50 m Länge) möglich ist, als dies für den Einsatz von Schleuderversatz mit Versatzabschnitten von etwa 9 m Länge bisher vorgesehen ist. Dadurch kann erreicht werden, daß der gegebenenfalls größere Aufwand an Tätigkeiten in der Nähe eingelagerter Gebinde im Falle von Pumpversatz (Aufbau von Dämm- und/oder Abschirmwänden) durch Reduktion der Anzahl der Versatzabschnitte zumindest kompensiert wird.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß sowohl Schleuderversatz wie auch Pumpversatz im Zusammenhang mit den zugehörigen Kammerabschlußbauwerken vergleichbar gute Eigenschaften für die Aktivitätsrückhaltung bzgl. abgeschlossener Einlagerungskammern besitzen. Die Ergebnisse der vorliegenden Analyse für normalbetriebliche und störungsbedingte Aktivitätsfreisetzungen aus abgeschlossenen Einlagerungskammern können deshalb auch - zumindest näherungsweise - zur Beurteilung des Emissionsverhaltens für den Einsatzfall von Pumpversatz herangezogen werden.

Auch im Hinblick auf den radiologischen Arbeitsschutz sind beide Versatztechniken prinzipiell als gleichwertig anzusehen. Ausschließlich die Gasproduktionsrate der Abfälle bedingt den geplanten Einsatzfall für die jeweilige Versatztechnik.

3. Störungsbedingte Aktivitätsfreisetzungen

3.1 Einlagerungskammern mit KAB Modell 1 Ausfall der KAB-Materialbarriere

Im folgenden werden die beiden Betriebsstörungen

- Versagen der Firstanbindung eines KAB Modell 1
- Auftreten von Klüften im Bypaß zu einem KAB Modell 1

im Hinblick auf die dadurch bedingte Aktivitätsfreisetzung über den bewetterten Grubenbereich in die Umgebung des geplanten Endlagers untersucht.

Beide Betriebsstörungen bewirken, daß

- die Aerosolrückhaltung infolge von Ab- und Anlagerungsprozessen sowie
- die zeitliche Verzögerung des Luft-/Gasaustausches infolge des Puffervolumens

im Schüttkörper des Kammerabschlußbauwerks gegenüber dem ungestörten Betrieb reduziert werden. Für die modellhafte Abschätzung der störungsbedingten Aktivitätsfreisetzung wird deshalb der effektive Durchlässigkeitsfaktor DFKAB des Kammerabschlußbauwerks für alle radioaktiven Stoffe gleich 1 gesetzt, d.h. es findet keine Aktivitätsrückhaltung oder -abschwächung für das Hineinströmen und den Durchtritt durch den Schüttkörper des KAB mehr statt.

Da in abgeschlossenen Einlagerungskammern mit KAB Modell 1 praktisch kein Überdruck auftreten kann (siehe Kap. 2.1.3), sind die Freisetzungsprozesse im Störfall die gleichen wie im ungestörten Fall. Infolge der Luftviskosität und der strömungshemmenden Wirkung des Kammerversatzes ist davon auszugehen, daß der störungsbedingte Luftwechsel der Kammer sich praktisch nicht erhöht und im Rahmen des für den Normalbetrieb als abdeckend unterstellten Luftwechsels mit $\beta_N = 2/a$ verbleibt.

Die störungsbedingte Aktivitätsfreisetzung AFS kann somit auf der Basis

- der Werte für die Aktivitätskonzentration in der Kammeratmosphäre nach Tabelle 7
- des Austausches des gesamten Luftgehalts der Kammer zweimal pro Jahr bzw. 1/6-mal pro Monat
- der unterstellten fehlenden Rückhaltewirkung bzw. fehlenden Verzögerung im Kammerabschlußbauwerk infolge der eingetretenen Störungen
- des Anstehens der Störung für die Dauer eines Monats bis zur Beseitigung der Störung

nach der Gleichung (28) quantifiziert werden.

$$AFS_n := AKZ_n \cdot \left[\frac{VK}{6} \right] \quad (28)$$

- mit AFS = störungsbedingte Aktivitätsfreisetzung (Bq/Monat)
- AKZ = Aktivitätskonzentration radioaktiver Stoffe in der Kammeratmosphäre (Tab. 7) (Bq/Kubikmeter)
- VK = Resthohlraumvolumen einer Einlagerungskammer (Kubikmeter)
- n = Index für die einzelnen Radionuklide bzw. Radionuklidgruppen

Die nach der Gleichung (28) berechneten störungsbedingten Aktivitätsfreisetzungen sind in der Tabelle 13 zusammengestellt.

Tabelle 13: Störungsbedingte Aktivitätsfreisetzung radioaktiver Stoffe für das Anstehen der Störung am KAB Modell 1 für den Zeitraum von einem Monat und für Kammerstandzeiten von 1 a und 40 a bis zum Störungseintritt

Aktivitätsfreisetzung radioaktiver Stoffe für die Störungsdauer von 1 Monat (Bq/Monat)

Behälterdurchlässigkeitsfaktor : Kammerstandzeit:	DF = 1 T = 1 a	DF = 0.01 T = 1 a	DF = 1 T = 40 a	DF = 0.01 T = 40 a
H 3 (unspez,HT)*	2.6 E+10	4.0 E+10	4.9 E+08	7.3 E+08
H 3 (Met.Festst.)	4.4 E+10	5.1 E+10	5.6 E+09	6.5 E+09
H 3 (HTO)	3.9 E+10	3.9 E+10	4.4 E+09	4.4 E+09
C 14 (flücht.)	3.4 E+08	5.9 E+08	3.2 E+08	5.6 E+08
C 14 (met.Fest.)	2.9 E+05	2.9 E+05	3.3 E+05	3.3 E+05
Rn222 (unfix.)	1.5 E+09	5.2 E+10	1.5 E+09	5.1 E+10
Rn222 (fix.)	1.5 E+09	3.2 E+09	1.5 E+09	3.2 E+09
I129 (unspez.)	1.1 E+03	3.2 E+03	1.1 E+03	3.2 E+03
β/Γ-Aerosole(F>1%)	1.1 E+04	1.1 E+05	1.1 E+04	1.1 E+05
β/Γ-Aerosole(F<1%)	1.1 E+03	1.1 E+03	1.1 E+03	1.1 E+03
α-Aerosole	3.4 E+01	3.4 E+01	3.4 E+01	3.4 E+01

* Siehe Anmerkung zu Tabelle 7

Zur Bewertung der störungsbedingten Aktivitätsfreisetzung werden die zugehörigen Freisetzungswerte mit den Antragswerten für bestimmungsgemäße Ableitungen radioaktiver Stoffe mit der Luft verglichen.

Diese Antragswerte für die einzelnen Radionuklide bzw. Radionuklidgruppen lauten:

H 3	1.5 E+13 Bq/a
C 14	3.7 E+11 Bq/a
I 129	7.4 E+06 Bq/a
Rn222	1.9 E+12 Bq/a
β/Γ -Aerosole	7.4 E+07 Bq/a
α -Aerosole	3.7 E+06 Bq/a

Da es für die beiden Nuklide H 3 und C 14 im Störungsfall zu keiner Erhöhung der normalbetrieblichen Aktivitätsfreisetzung (siehe Tab. 8) aus Einlagerungskammern kommt, die mit einem KAB Modell 1 abgeschlossen sind, werden diese beiden Nuklide bei dem Vergleich nicht miteinbezogen. Der Ausschöpfungsgrad der Antragswerte durch die störungsbedingte Aktivitätsfreisetzung nach Tabelle 13 sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 14: Ausschöpfungsgrad der Antragswerte für bestimmungsgemäße Aktivitätsableitungen mit der Luft durch die störungsbedingte Aktivitätsfreisetzung

	Ausschöpfungsgrad (%/Monat) in Abhängigkeit von der spezifizierten Behälterdichtigkeit (DF):	
	DF = 1	DF = 0.01
Rn222 (unfix.)	0.078	2.7
Rn222 (fix.)	0.078	0.17
I 129 (unspez.)	0.015	0.043
β/Γ -Aerosole (F>1%)	0.015	0.15
β/Γ -Aerosole (F<1%)	0.0015	0.0015
α -Aerosole	0.0009	0.0009

Nach Tab. 14 ist zu ersehen, daß die Ausschöpfungsgrade bis auf eine Ausnahme im Bereich zwischen etwa 0.001 und 0.17 %/Monat Störungsdauer liegen. Die niedrigen Werte der Ausschöpfungsgrade weisen aus, daß - selbst bei längerfristigerem Anstehen der Störungen - die dadurch bedingten Aktivitätsfreisetzungen gering sind.

Lediglich die störungsbedingte Rn222-Freisetzung als Folge der Einlagerung von Ra226 in einer einzigen Spezifikation (unfixierte Abfälle innerhalb von Behältern mit spezifizierter Dichtigkeit) liegt der ermittelte Ausschöpfungsgrad mit 2.7 %/Monat oberhalb der vorgenannten niedrigen Bandbreite.

Dazu ist anzumerken, daß Rn222 wegen der relativ kurzen Halbwertszeit von 3.8 d einen Sonderfall darstellt. Bei der Ermittlung der störungsbedingten Aktivitätsfreisetzung wurde nicht berücksichtigt, daß durch

- den Kammerversatz eine teilweise Abfallfixierung gegeben ist, so daß effektiv eine unfixierte Abfallform für Ra226 nicht mehr vorliegt,
- zusätzliche Feldabschlüsse eine weitgehende Unterbindung der Rn222-Freisetzung aus Kammern mit längerer Standzeit erreicht werden kann und
- administrative Maßnahmen (z.B. Einlagerung der wenigen Rn222-freisetzenden Gebinde weiter vom KAB entfernt im Kammerinneren (siehe Kap. 2.3.4)) eine weitgehende Unterbindung der Rn222-Freisetzung praktisch aus allen Kammern mit KAB Modell 1 erreicht werden kann.

Wegen des bereits als relativ niedrig einzustufenden Ergebnisses für den Ausschöpfungsgrad des Antragswertes durch die störungsbedingte Rn222-Freisetzung (2.7 % pro Monat) wurde auf eine detailliertere Quantifizierung speziell für Rn222 im Rahmen dieser modellhaften Abschätzung verzichtet. Daher sind die Ergebnisse speziell für Rn222 als besonders konservativ anzusehen.

3.2 Einlagerungskammern mit KAB Modell 2 Druckentlastung über das Drucküberwachungs- und Regelsystem

Für Dichtigkeitsbetrachtungen eines KAB Modell 2 ist neben dem eigentlichen Abschlußbauwerk (ringförmiges Stahlbetonbauwerk mit eingesetztem Betonabschluß) auch der streckennahe Bereich (SNB) um das Abschlußbauwerk von besonderer Relevanz. Zur Übersicht ist in Abbildung 11 ein Querschnitt durch ein KAB Modell 2 und den SNB gemäß /AGK 89b/ eingezeichnet.

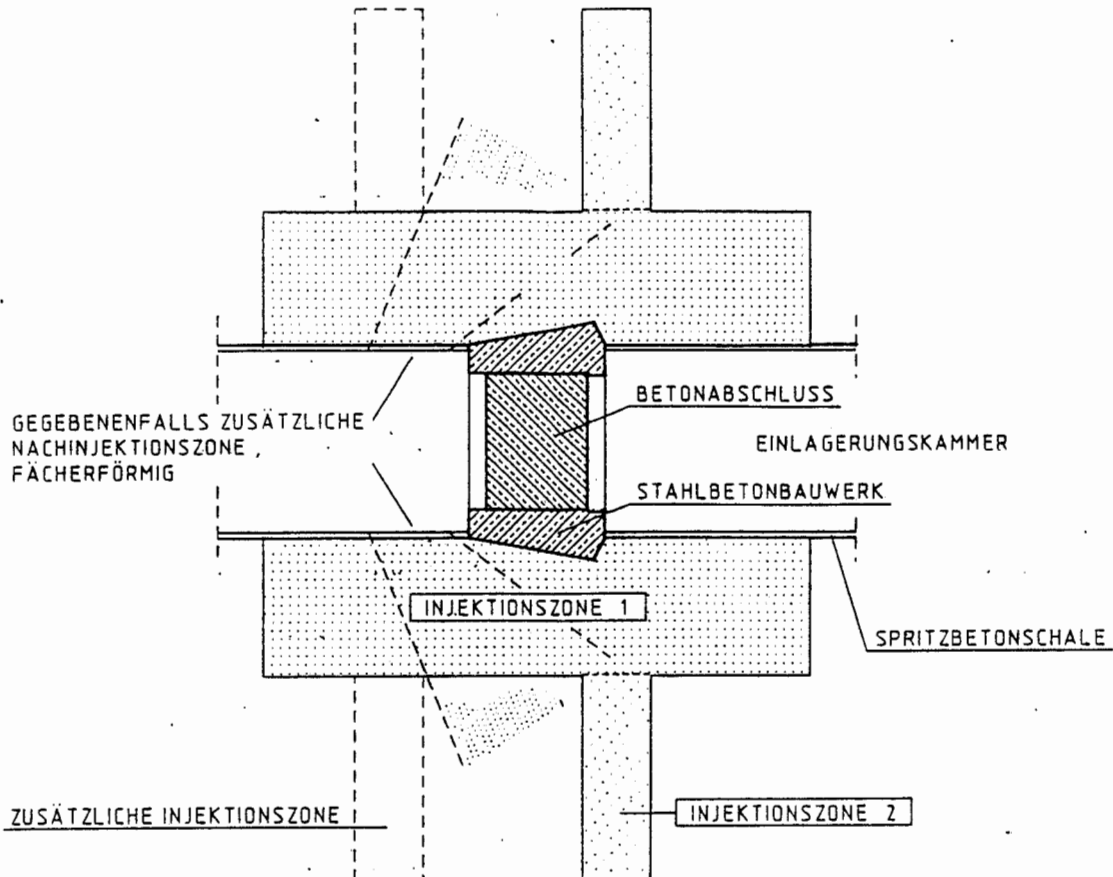


Abbildung 11: Querschnitt durch ein KAB Modell 2 und den SNB gemäß /AGK 89b/

Das Betonabschlußbauwerk mit einem Radius von etwa 4 m ist von einer abgedichteten SNB-Zone (Injektionszone 1) von etwa 6 m Tiefe und etwa 24 m Länge umgeben. Die bereits durchgeführten Wasserdruck-Versuche hatten zum Ergebnis, daß das Gebirge im streckennahen Bereich - in einer Tiefe von mehr als 6 m von der Ausbruchslaibung des KAB entfernt - bereits ohne Injektionsabdichtung die auslegungsgemäße Anforderung an die Permeabilität (siehe Kap. 2.4.1) unterschreitet /AGK 89b/. Deshalb können die Dichtigkeitsbetrachtungen auf den durch die Injektionszone 1 vorgegebenen Bereich begrenzt werden.

Der Volumenstrom durch einen permeablen Körper ist nach Gleichung (8) (Darcy-Beziehung) proportional zu dem Quotienten aus der Querschnittsfläche F und der Länge L . Da der Betonkörper des KAB nur etwa 16 % der Gesamt-Querschnittsfläche (KAB und SNB) darstellt und die Quotienten F/L für das KAB und für den SNB vergleichbar sind, kann für integrale Dichtigkeitsberechnungen von den äußeren geometrischen Abmessungen des SNB (Injektionszone 1) ausgegangen werden. Diese Abmessungen sind:

- Länge ca. 24 Meter
- Querschnittsfläche ca. 320 Quadratmeter

Die Permeabilität des SNB wurde vor und nach unterschiedlichen Abdichtmaßnahmen mittels Wasserdruck(WD)-Versuchen ausgemessen /AGK 89b/. Die dabei erfaßten Wasserdurchlässigkeitsbeiwerte k_f wurden dann - mit der Äquivalenz von Wasserdurchlässigkeitsbeiwert $k_f = 1.5 \text{ E-}07 \text{ m/s}$ und Gebirgspermeabilität $K = 1 \text{ E-}14 \text{ Quadratmeter}$ - in Gebirgspermeabilitätswerte umgerechnet.

Diese WD-Versuche führten in Abhängigkeit von der Abdichtmaßnahme zu den folgenden Ergebnissen:

- Die niedrigste Schwankungsbreite der lokalen Gebirgspermeabilitäten K lag in dem Wertebereich $K = 0.07 \text{ E-}14 \dots 1.5 \text{ E-}14 \text{ Quadratmeter}$.
- Der niedrigste Mittelwert der Gebirgspermeabilität lag bei etwa $K = 0.7 \text{ E-}14 \text{ Quadratmeter}$, d.h. der erreichte Mittelwert lag um einen Faktor von etwa 1.4 unterhalb des geforderten integralen Auslegungswerts von $K = 1 \text{ E-}14 \text{ Quadratmeter}$.

Mit dem für KAB und SNB gültigen Auslegungswert der Permeabilität und den oben angegebenen integralen Abmessungen L und F wurde der zeitliche Druckverlauf innerhalb einer abgeschlossenen Kammer nach einer anfänglichen Druckbeaufschlagung innerhalb bzw. Druckabsenkung außerhalb der Kammer nach den Gleichungen (12) und (13) berechnet.

Die Ergebnisse sind in der Abb. 12 graphisch aufgetragen. Danach ist zu erkennen, daß für Kammern mit KAB Modell 2 äußere Luftdruckschwankungen nur noch geringfügig (mit etwa 1.5 %/d) auf das Kammerinnere übergreifen können.

Die nach der Gleichung (13) berechnete Zeitkonstante T für den Druckverlauf ist relativ groß und beträgt $T = 1630 \text{ h} = 68 \text{ d}$. Infolge dieser großen Zeitkonstanten von mehr als 2 Monaten ist das zeitliche Integral über statistisch verteilte Luftdruckschwankungen und damit der Durchgriff äußerer Luftdruckschwankungen auf die Kammeratmosphäre nur im geringfügigen Maße möglich.

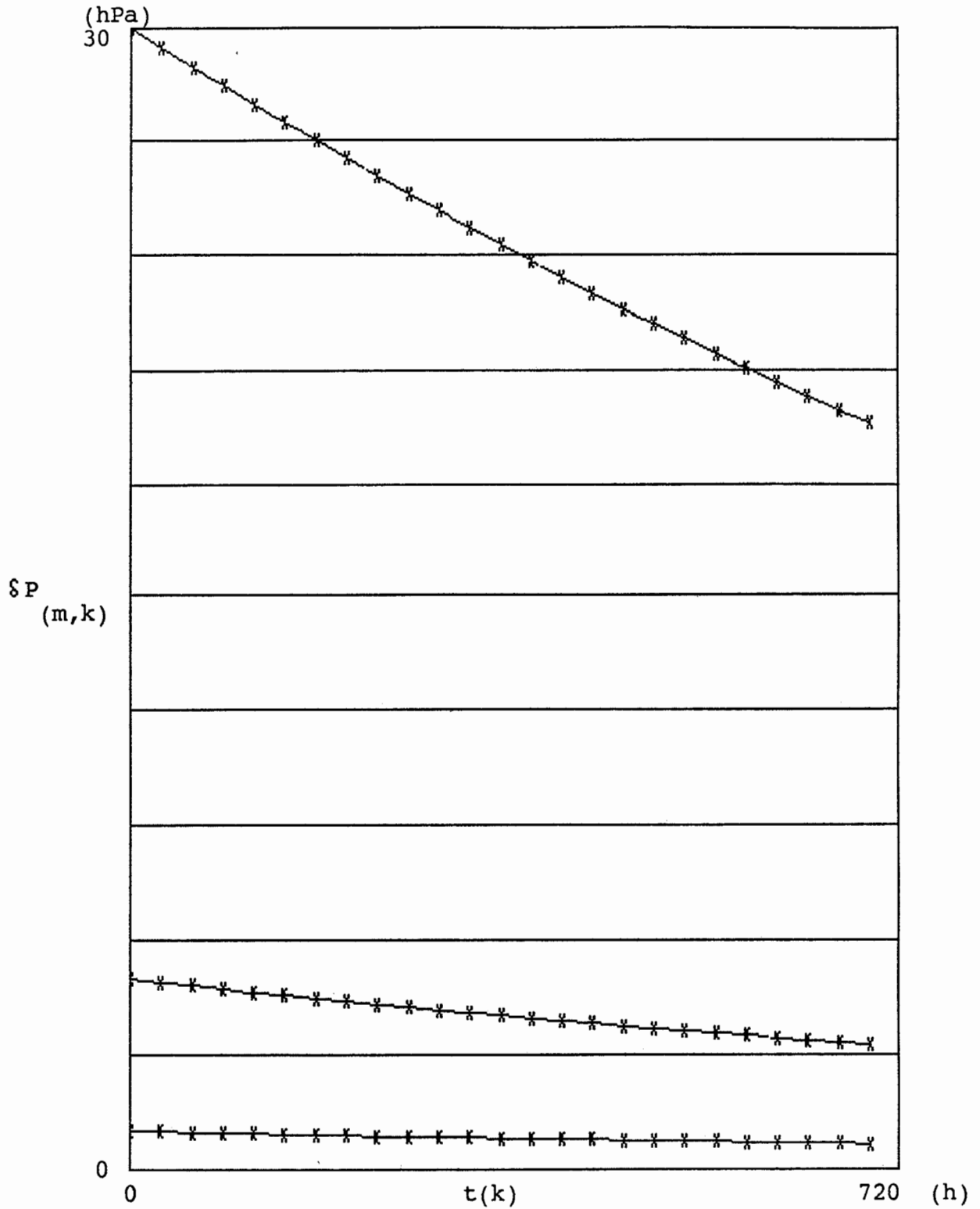


Abb. 12: Zeitliches Abklingen eines Überdrucks in der Einlagerungskammer für die auslegungsgemäße Permeabilität des KAB bei anfänglichen Druckbeaufschlagungen : $\Delta p = 1, 5, 30$ hPa
einer KAB/SNB-Länge : $L = 24$ Meter
einem KAB/SNB-Querschnitt : $F = 320$ Quadratmeter
und einer Permeabilität : $K = 1E-14$ Quadratmeter

In Einlagerungskammern mit KAB Modell 2 ist zu erwarten, daß es zu einem realen bzw. virtuellen Gasanfall insbesondere durch Behälterkorrosion, Radiolyse und Gebirgskonvergenz von etwa 100 Kubikmeter pro Jahr kommen kann (siehe hierzu Kapitel 2.2). Falls dieser Gasanfall infolge der Kammerdichtigkeit nicht vollständig wieder aus der Kammer abgeführt wird, kommt es zu einem zeitlichen Druckaufbau innerhalb der Kammer. Da sich auch der Volumenstrom über KAB/SNB infolge des inneren Druckaufbaus erhöht, stellt sich ein maximaler Kammerüberdruck ein, für den der Gasanfall innerhalb der Kammer gleich dem Gasabtransport über KAB/SNB ist.

Für die Auslegungspermeabilität K (1 E-14 Quadratmeter) des KAB/SNB wurde der sich einstellende maximale Kammerüberdruck in Abhängigkeit von dem Gasanfall innerhalb der Kammer nach der Gleichung (8) berechnet und in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 15: Maximaler Kammerüberdruck (nach Darcy) in Abhängigkeit vom Gasanfall innerhalb der Einlagerungskammer für die Auslegungspermeabilität von KAB/SNB

Gasanfall innerhalb der Einlagerungskammer (Kubikmeter/Jahr)	Maximaler Kammerüberdruck (hPa)
50	2.2
100	4.3
500	21.2
1000	42.0

Nach Tabelle 15 ist zu ersehen, daß für die Auslegungspermeabilität von KAB/SNB ein jährlicher Gasanfall innerhalb einer abgeschlossenen Einlagerungskammer von bis zu etwa 100 Kubikmeter pro Jahr lediglich zu einem Überdruck innerhalb der Kammer von etwa 4 hPa (mbar) führt, da dann die anfallende Gasmenge überdruckbedingt über KAB/SNB aus der Kammer wieder abgeführt wird. Selbst bei Annahme des niedrigsten Permeabilitätswertes (0.07 E-14 Quadratmeter), der in einem geeignet abgedichteten SNB lediglich lokal gemessen werden konnte /AGK 89b/, für den gesamten Bereich von KAB/SNB, würde es bei gleichem Gasanfall nur zu einem maximalen Kammerüberdruck von etwa 60 hPa kommen. Wie die Messungen jedoch gezeigt haben /AGK 89b/, ist ein mittlerer und für den gesamten Bereich von KAB/SNB integral wirksamer Permeabilitätswert eher deutlich dichter unterhalb des Auslegungswertes für die KAB/SNB-Permeabilität zu erwarten als in der Nähe des niedrigsten lokalen Permeabilitätsmeßwertes.

Zur Überwachung und Regelung des Kammerüberdrucks während der Betriebsphase wird in den KAB-Betonabschluß eine Instrumentierungs- und Armaturenkombination installiert /AGK 89b; SIM 89b/. Wie die voranstehenden Druckaufbaurechnungen gezeigt haben, ist ein solches Überwachungs- und Regelungssystem auslegungsgemäß nicht erforderlich. Dieses System hat ausschließlich folgende betriebliche Aspekte zu erfüllen:

- Zeitliche Überwachung des Kammerdruckverlaufs
- Gasprobennahme aus der Kammeratmosphäre

Neben den beiden betrieblichen Funktionen ist durch das Drucküberwachungs- und Regelungssystem lediglich die Option einer regelbaren Druckentlastung unter Beachtung radiologischer Aspekte (Schwebstofffilterung und gezielte Ableitung der Kammerabluft) gegeben.

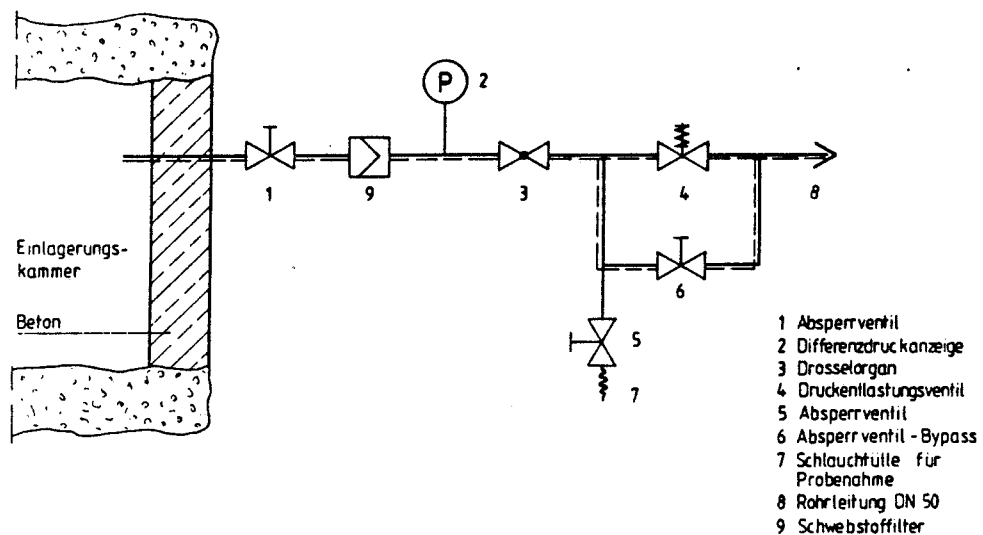


Abb. 13: Drucküberwachungs- und Regelungssystem für ein Kammerabschlußbauwerk Modell 2 /SIM 89b/

Da in Einlagerungskammern mit KAB Modell 2 auslegungsgemäß nur geringe Überdrücke von einigen hPa (mbar) auftreten können, ist eine Druckentlastung über das Drucküberwachungs- und Regelungssystem nicht erforderlich und auch betrieblich nicht vorgesehen.

Um jedoch die radiologischen Auswirkungen von z.B. mehrfachen Gasprobenahmen abdeckend zu erfassen, wird im folgenden die Aktivitätsfreisetzung für eine fiktive Druckentlastung um $\delta p = 50$ hPa (mbar) quantifiziert.

Das Drucküberwachungs- und Regelungssystem ist für niedrige Abluftströme im Bereich von etwa 0.04 bis 4 Kubikmeter/h /AGK 89b/ ausgelegt. Die nach dem konservativen Berechnungsmodell (siehe Kap. 2.2) ermittelten Aerosolkonzentrationen in der Kammeratmosphäre sind abdeckend für diese Abluftströme aus der Kammer.

Das Drucküberwachungs- und Regelungssystem enthält ein Schwebstofffilter mit hoher Filterwirkung für Aerosole (gemäß DIN 24184). Entsprechend den Anforderungen an betriebliche Filter wird von einer Aerosolrückhaltung von 99 % bzw. von einer Aerosoldurchlässigkeit von 1 % ausgegangen.

Die störungsbedingte Aktivitätsfreisetzung für den unterstellten Fall 'Druckabsenkung einer Kammer mit KAB Modell 2 um 50 hPa über das Drucküberwachungs und Regelungssystem' wird nach der Formel (29) berechnet:

$$AFS_n := \left[AKZ_n \cdot VK_n \cdot \left[\frac{\delta pa}{p_u + \delta pe} \right] \right] \cdot DFSF_n \quad (29)$$

mit	AFS	= störungsbedingte Aktivitätsfreisetzung	(Bq/Störung)
	AKZ	= Aktivitätskonzentration in der Kammeratmosphäre (nach Tab. 11)	(Bq/Kubikmeter)
	VK	= Resthohlraumvolumen in einer abgeschlossenen Kammer) (siehe Kap. 2.2)	(ca. 5000 Kubikmeter)
	p _u	= atmosphärischer Luftdruck im bewetterten Bereich vor der Kammer (siehe Kap. 2.1)	(ca. 1150 hPa)
	δ p _a	= Druckabsenkung in der Einlagerungskammer	(50 hPa)
	δ p _e	= Kammerüberdruck nach der Druckabsenkung	(0 hPa)
	DFSF	= Durchlässigkeitsfaktor des Schwebstofffilters	(1.0 für Gase bzw. 0.01 für Aerosole)
	n	= Index für die einzelnen Nuklide	

Die für die unterstellte Störung berechneten Aktivitätsfreisetzungswerte sind in der Tabelle 16 zusammengestellt. Danach ist zu ersehen, daß für die zeitliche Abhängigkeit der störungsbedingten Aktivitätsfreisetzung von der Kammerstandzeit T die gleichen nuklidspezifischen Abhängigkeiten vorliegen, wie sie auch für die Aktivitätskonzentrationen in der Kammeratmosphäre gelten (siehe Kapitel 2.4.3).

Ein Vergleich der normalbetrieblichen Freisetzungswerte (Bq/a) nach Tabelle 12 mit den störungsbedingten Freisetzungswerten (Bq/Störung) nach Tabelle 16 zeigt, daß die letzteren für die radioaktiven Gase H 3 und C 14 um einen Faktor von etwa 2 größer als die jährlichen Normalbetriebswerte sind. Die störungsbedingten Aktivitätsfreisetzungswerte für Rn222 sind als relativ niedrig und diejenigen für I 129, β/Γ- und α-Aerosole sind als äußerst geringfügig einzustufen, wie auch ein Vergleich mit Antragswerten zeigen wird.

Tabelle 16: Störungsbedingte Aktivitätsfreisetzung für den Störfall:
 Unterstellte Druckabsenkung um 50 hPa (50 mbar) einer Einlagerungskammer mit KAB Modell 2

Radionuklid/ Radionuklidgruppe	Störungsbedingte Aktivitätsfreisetzung (Bq/ Störung) für die Kammerstandzeiten:		
	T = 1 a	T = 10 a	T = 40 a
H 3 (HTO)	2.3 E+11	1.4 E+11	2.5 E+10
H 3 (HT) für sonstige Aktivität < 1 E+10 Bq	3.3 E+10	1.8 E+11	1.0 E+11
H 3 (HT) für sonstige Aktivität < 1 E+12 Bq	3.5 E+10	1.9 E+11	1.1 E+11
H 3 (HT) für sonstige Aktivität > 1 E+12 Bq	5.8 E+10	2.5 E+11	7.0 E+10
C 14 (flüchtig)	1.7 E+09	1.5 E+10	4.3 E+10
C 14 (Met.Fest.)	3.4 E+04	3.1 E+05	9.5 E+05
Rn 222 (unfixiert)	2.8 E+09	2.8 E+09	2.8 E+09
I 129 (unspezifiziert)	1.7 E 00	1.7 E 00	1.7 E 00
β/Γ-Aerosole (F > 1 %)	6.0 E+01	6.0 E+01	6.0 E+01
β/Γ-Aerosole (F < 1 %)	6.0 E-01	6.0 E-01	6.0 E-01
α-Aerosole	1.8 E-02	1.8 E-02	1.8 E-02

Zur weitergehenden Bewertung der störungsbedingten Aktivitätsfreisetzung werden - wie im Falle der Störung am KAB Modell 1 - die zugehörigen Freisetzungswerte mit den Antragswerten für bestimmungsgemäße Ableitungen mit der Luft (siehe Kapitel 3.1) verglichen.

Der Ausschöpfungsgrad der Antragswerte durch die störungsbedingten Aktivitätsfreisetzungswerte sind in der Tabelle 17 zusammengestellt. Anhand der Ausschöpfungsgrade ist deutlich zu ersehen, daß die störungsbedingten Aktivitätsfreisetzungswerte zumeist niedrig bzw. äußerst niedrig sind.

Danach steigt der Ausschöpfungsgrad pro Störfall für Tritium (Summe aus HT- und HTO-Anteilen) in Abhängigkeit von der Kammerstandzeit von 1.9 % (T = 1 a) auf etwa 2.6 % (T = 10 a) an und fällt dann auf etwa 0.9 % (T = 40 a) wieder ab.

Tabelle 17: Ausschöpfungsgrad der Antragswerte mit der Luft durch die störungsbedingte Aktivitätsfreisetzung für den Störfall: Unterstellte Druckabsenkung um 50 hPa (50 mbar) einer Einlagerungskammer mit KAB Modell 2

Radionuklid/ Radionuklidgruppe	Ausschöpfungsgrad (% /Störung) für die Kammerstandzeiten:		
	T = 1 a	T = 10 a	T = 40 a
H 3 (HTO)	1.51	0.90	0.17
H 3 (HT) für sonstige Aktivität < 1 E+10 Bq	0.22	1.21	0.68
H 3 (HT) für sonstige Aktivität < 1 E+12 Bq	0.23	1.28	0.71
H 3 (HT) für sonstige Aktivität > 1 E+12 Bq	0.38	1.69	0.46
C 14 (flüchtig)	0.46	4.15	11.52
C 14 (Met.Fest.)	0.000009	0.00008	0.0003
Rn 222 (unfixiert)	0.15	0.15	0.15
I 129 (unspezifiziert)	0.00002	0.00002	0.00002
β/Γ-Aerosole (F > 1 %)	0.00008	0.00008	0.00008
β/Γ-Aerosole (F < 1 %)	0.0000008	0.0000008	0.0000008
α-Aerosole	0.0000005	0.0000005	0.0000005

Für C 14 in der flüchtigen Form steigt der Ausschöpfungsgrad pro Störfall stetig von etwa 0.5 % (T = 1 a) auf etwa 11.5 % (T = 40 a) an, wobei der Anstieg mit zunehmender Kammerstandzeit abnimmt. Für die C 14-haltigen metallischen Abfälle ist ein praktisch linearer Anstieg im äußerst niedrigen Bereich von etwa 0.000009 % bis 0.0003 % zu erkennen. Bei einer Mischung der eingelagerten Abfälle von C 14 (flüchtig) und C 14 (metallische Feststoffe) im Verhältnis von z.B. etwa 9 : 1 kommt es zu Ausschöpfungsgraden pro Störfall im Prozentbereich, wie es auch für die tritiumhaltigen Abfälle der Fall ist.

Der entsprechende Ausschöpfungsgrad für Rn222 in unfixierte Ra226-Abfälle liegt unabhängig von der Kammerstandzeit bei dem niedrigen Wert von etwa 0.15 %. Für die restlichen radioaktiven Stoffe (I 129, β/Γ- und α-Aerosole) liegen diese Ausschöpfungsgrade um mehr als 4 Größenordnungen unterhalb von 1 %.

4 Erkennungsmöglichkeiten und radiologische Bedeutung von Störungen an abgeschlossenen Einlagerungskammern

Zum Erkennen von Aktivitätsfreisetzungen aufgrund von Störungen an abgeschlossenen Einlagerungskammern stehen prinzipiell folgende radiologische Meßmethoden zur Verfügung:

- Ortsdosis- und Ortsdosisleistungsmessungen (OD- und ODL-Messung)
- Aktivitätskonzentrationsmessungen in den Wettern (bzw. den Resthohlräumen)
- Kontaminationsmessungen an Proben des KAB-Körpers, des Gesteins des streckennahen Bereichs (SNB) des KAB oder des Gesteins benachbarter Strecken.

Alle drei Methoden sollen im betrieblichen Routineüberwachungsprogramm des Strahlenschutzes zum Einsatz kommen /PTB 89b, DBE 89a/.

4.1 Meßmöglichkeiten bei Störungen an Einlagerungskammern mit KAB Modell 1 und Konsequenzen für Folgemaßnahmen

In Kap. 3.1 ist die Höhe der Freisetzung radioaktiver Stoffe im Falle einer 1 Monat dauernden Störung an einer mit einem KAB Modell 1 abgeschlossenen Einlagerungskammer abgeleitet. Für den Zweck des Erkennens einer solchen Störung erscheint prinzipiell eine gestufte Vorgehensweise sinnvoll:

1. Qualitative Beobachtung des radiologischen Zustandes der möglicherweise betroffenen Regionen durch langfristige Beobachtung von "Pegeln".
2. Quantitative Ermittlung der störungsbedingten Aktivitätsfreisetzung, soweit möglich.

Für den ersten Schritt eignen sich OD- und ODL-Messungen unmittelbar vor einem KAB Modell 1 oder bei Verdacht - z.B. bei sichtbaren großen Klüften - in benachbarten Strecken. Sie können Hinweise auf freigesetzte Gamma-Strahler geben (im wesentlichen Aerosole). Ebenso eignen sich nuklidspezifische Auswertungen von Gesteins- oder Staubproben aus unmittelbarer Nachbarschaft des KAB Modell 1 oder ggf. aus benachbarten Strecken. Bei regelmäßiger Probenahme auch schon vor und während der Kammerbefüllung können ortsspezifische Grundpegel bzw. ein Abweichen von ihnen ermittelt werden. Schließlich stehen im Endlager Konrad mobile Aerosolsammelgeräte zur Verfügung, die wettermäßig "vor" und "nach" einer befüllten, abgeschlossenen Einlagerungskammer oder auch in unmittelbarer Nähe des KAB Modell 1 bzw. in benachbarten Strecken eingesetzt werden können. Auswertungen der Filterbeaufschlagung im Labor geben Auskunft über Unterschiede von Aktivitätskonzentrationen "vor" und "nach" einer Kammer oder über Abweichungen von längerfristig beobachteten Pegeln in unmittelbarer Nachbarschaft eines KAB Modell 1. Für Radon werden gesonderte Meßgeräte eingesetzt.

Wenn die Ergebnisse der oben aufgeführten Messungen Hinweise auf möglicherweise störungsbedingte Aktivitätsfreisetzungen geben, kann gezielt eine "Einkreisung" der Quelle und eine quantitative Ermittlung der Freisetzungsrates angestrebt werden. Dazu wird die auf Filtern gesammelte Aktivität nuklidspezifisch bestimmt, wobei die Auswahl der zu messenden Radionuklide auch durch die Höhe der Aktivitätsinhalte und die Art der Konditionierung der eingelagerten radioaktiven Abfallgebinde bestimmt wird. Im Falle von eingelagerten radiumhaltigen Abfallgebänden wird insbesondere nach Rn 222, im Falle von jodhaltigen Abfallgebänden speziell nach I 129 gesucht.

Im folgenden wird die Ermittlung einer störungsbedingten Aktivitätskonzentration sowohl abwetterseitig von einer abgeschlossenen Einlagerungskammer als auch im Gesamtabwetterstrom (Diffusor)

betrachtet. Beispielhaft und hinsichtlich der Detektierbarkeit abdeckend wird unterstellt, daß unter Tage an einer abgeschlossenen Einlagerungskammer ein radiologisch unbelasteter "Frischwetterstrom" von $\dot{V}_{UT} = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ /DBE 89b/ zur Bewetterung von in Befüllung befindlichen Kammern vorbeiströmt. Diese Betriebssituation ergibt sich beispielsweise dann, wenn die erste von z. B. vier von einer "Rampe" abzweigenden Einlagerungskammern befüllt und mit einem KAB Modell 1 verschlossen ist, während die übrigen drei Kammern leer bzw. in Befüllung befindlich sind und daher mit z. B. $50 \text{ m}^3/\text{s}$ frischbewettert werden (Abb. 14):

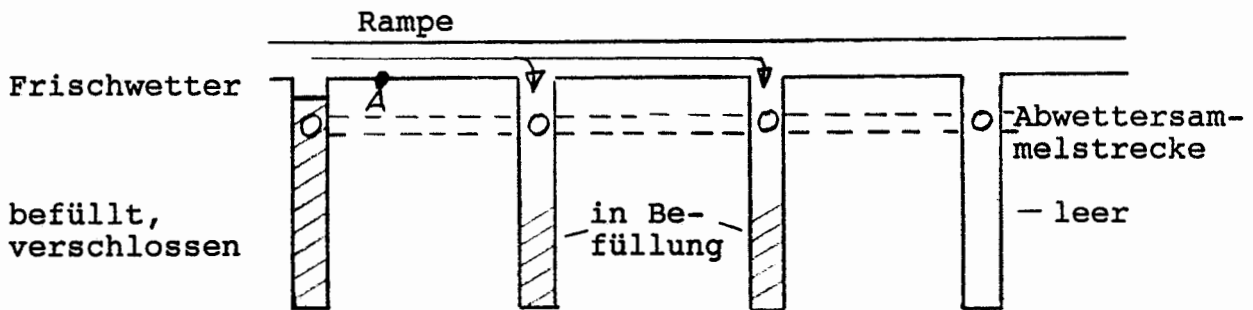


Abbildung 14: Beispiel einer Einlagerungssituation mit einer verschlossenen, zwei in Befüllung befindlichen und einer leeren Einlagerungskammer

Es wird eine "Meßstelle" in der Position A angenommen. Für den Gesamtabwetterstrom wird ein Wert von $\dot{V}_{DIFF} = 260 \text{ m}^3/\text{s}$ angesetzt /DBE 89b/.

In Tabelle 18 sind für die in Kap. 3.1 hinsichtlich der Freisetzung bewerteten Radionuklide/Radionuklidgruppen folgende Größen aufgelistet:

AF = auf ein Jahr umgerechnete störungsbedingte Aktivitätsfreisetzung aus Kap. 3.1 (Bq/a)

$$CUT = \frac{AF \text{ (Bq/a)}}{3,14 \cdot 10^7 \text{ (s/a)} \cdot \dot{V}_{UT} \text{ (m}^3/\text{s)}}$$

= störungsbedingte, abwetterseitig an Meßstelle A auftretende Aktivitätskonzentration (Bq/m³)

AW = Antragswert für Aktivitätsableitung mit dem Gesamtabwetterstrom (Bq/a)

$$\text{CAW} = \frac{\text{AW (Bq/a)}}{3,14 \cdot 10^7 \text{ (s/a)} \cdot \dot{V}\text{DIFF (m}^3\text{/s)}}$$

= Aktivitätskonzentration am Diffusor bei vollständiger Ausschöpfung der Antragswerte (Bq/m³)

EW = Erwartungswert für die Aktivitätsableitung gemäß Szenario 1 aus /PTB 89c/ (Bq/a)

$$\text{CEW} = \frac{\text{EW (Bq/a)}}{3,14 \cdot 10^7 \text{ (s/a)} \cdot \dot{V}\text{DIFF (m}^3\text{/s)}}$$

= Aktivitätskonzentration am Diffusor bei Ableitung von Aktivität gemäß Szenario 1 (ungestörter Betrieb) (Bq/m³)

$$\Delta\text{CAF} = \frac{\text{AF (Bq/a)}}{3,14 \cdot 10^7 \text{ (s/a)} \cdot \dot{V}\text{DIFF (m}^3\text{/s)}}$$

= über den ungestörten Betrieb (CEW) hinausgehende, störungsbedingte Aktivitätskonzentration am Diffusor (Bq/m³)

CNWGR = Nachweisgrenze für Aktivitätskonzentrationen (Bq/m³) mit Kommentar

Aus den Zahlenwerten der Tabelle 18 ergibt sich folgende Bewertung der Möglichkeiten zur quantitativen Bestimmung störungsbedingter Aktivitätskonzentrationen:

Rn 222

Untertägig läßt sich eine störungsbedingte Aktivitätsfreisetzung, unter Berücksichtigung des schon vorhandenen Radonpegels von erfahrungsgemäß ca. 100 Bq/m³ in Frischwettern /PTB 89d/ - im Stunden- bis Tagebereich quantitativ gut detektieren. Auch im Gesamtabwetterstrom ist, z. T. mit höherem Aufwand eine quantitative Messung möglich, wenn der störungsfreie Anteil lange genug beobachtet und in Abzug gebracht wird.

I 129, Aerosole

Die störungsbedingten untertägigen Aktivitätskonzentrationen betragen für I 129 ca. 1-3 % des Wertes am Diffusor bei Ausschöpfung des Antragswertes, am Diffusor selbst liegen sie noch einmal um einen Faktor 5 niedriger. Eine quantitative Messung erscheint mit größerem Aufwand unter Tage nur möglich, wenn für die Messung die Bewetterungsrate stark aber definiert reduziert

Tabelle 18: Übersicht über die Aktivitätskonzentrationen unter Tage und am Diffusor im Falle einer Störung an einer mit einem KAB Modell 1 abgeschlossenen Einlagerungskammer. Vergleich mit den Aktivitätskonzentrationen am Diffusor im ungestörten Fall.

Radionuklid/ -gruppe	DF	AF Bq/a	CUT Bq/m ³	AW Bq/a	CAW Bq/m ³	EW Bq/a	CEW Bq/m ³	ΔCAF Bq/m ³	CNWGR Bq/m ³	Kommentar	
Rn 222 unfix.	1	1,8 E10	11,5							50(±25%) bei 60 Tage- 33(±36%) Messung	1)
Rn 222 unfix.	0,01	6,24E11	397	1,9E12	232	4,9E10	6,0			17(±51%) ca. 10(±60%) bei 1 Tage-Messung ca.100(± 6%) und α -Korrektur	2)
Rn 222 fix.	1	1,8 E10	11,5							ca.100(±10%) bei Messung 1 Std	
Rn 222 fix.	0,01	3,84E10	24,5	1,9E12)	232)	1,9E12)	232)			ca. 12(±55%) bei Messung 1/2 Std	3)
I 129 unspez.	1	1,32E4	8,4E-6							1,5E-3 für I 131 nach KTA 1503.1 ca. 1E-2...1E-3 für I 129 bei 10 d Messung Konrad	
I 129 unspez.	0,01	3,84E4	2,4E-5	7,4E6	9,0E-4	7,3E4	9,0E-6			4,6E-6	
β/γ - Aero- sole (F>1)	1	1,32E5	8,4E-5							3,7E-3 für α -Strahler nach KTA 1503.1	
	0,01	1,32E6	8,4E-4	7,4E7	9,0E-3	9,2E6	1,2E-3			1,6E-5 1,6E-4	3,7E-4 für Sr 90 nach KTA 1503.1 = 1E-6 für Sr 90 möglich bei langer Sammelzeit
β/γ - Aero- sole (F<1%)	1									3,7E-3 für β -Strahler nach KTA 1503.1	
	0,01	1,32E4	8,4E-6	7,4E7	9,0E-3	9,2E6	1,2E-3			1,6E-6	3,7E-4 für Sr 90 nach KTA 1503.1 = 1E-6 für Sr 90 möglich bei langer Sammelzeit
α - Aero- sole	1									1,5E-3 für α -Strahler nach KTA 1503.1	
	0,01	4,08E2	2,6E-7	3,7E6	4,5E-4	2,1E3	2,6E-7			5,0E-8	=1E-6 für α -Strahler möglich bei langer Sammelzeit

1) Passives Radondosimeter (α -Spur-Detektor) KfK

2) "Electret-Radon-Dosimeter" "E-Perm-1"

3) Radonmonitor RM 3-A (ALNOR)

*) Erwartungswert aufgrund der Ableitung des aus dem Gestein austretenden (natürlichen) Radons

wird.

Die störungsbedingten Aerosolfreisetzen liegen gegenüber den Antrags- oder auch Erwartungswerten noch niedriger. Auch hier muß davon ausgegangen werden, daß eine quantitative Bestimmung der störungsbedingten Aktivitätskonzentration nur mit größerem Aufwand und nur bei reduzierter untertägiger Bewetterungsrate möglich ist.

Insgesamt gesehen kann somit festgestellt werden, daß eine störungsbedingte Aktivitätsfreisetzung mit der geplanten Strahlenschutzinstrumentierung detektierbar und - mit Aufwand - quantifizierbar ist. Aufgrund der geringen radiologischen Relevanz der Störungen - außer für unfixierte Ra 226-haltige Abfälle in Behältern mit spezifizierter Dichtheit - steht jedoch viel Zeit zur Verfügung, geeignete Maßnahmen für die Beseitigung der Störung zu ergreifen.

Wenn als Kriterium für das Ergreifen von Gegenmaßnahmen zur Beseitigung von Störungen eine integrale 10%-Abgabe, bezogen auf den jeweiligen Jahres-Antragswert, angesetzt wird, ergeben sich nach Tabelle 18 rechnerisch folgende Zeiten, innerhalb derer die Störung zu beheben ist (Tab. 19):

Tabelle 19: Zur Behebung einer Störung an einer mit einem KAB Modell 1 abgeschlossenen Einlagerungskammer zur Verfügung stehende Zeit

Radionuklid /-gruppe	DF	Zur Verfügung stehende Zeit zur Behebung einer Störung	
Rn 222 unfix.	1	}	10 Jahre
Rn 222 fix.	0,01		110 Tage
Rn 222 unfix.	0,01		5 Jahre
I 129 unspez.	1	>40 Jahre	(55 Jahre)
I 129 unspez.	0,01	20 Jahre	
β/γ -Aerosole (F > 1 %)	1	}	>40 Jahre (55 Jahre)
β/γ -Aerosole (F < 1 %)	0,01		5 Jahre
β/γ -Aerosole (F < 1 %)	1	}	>40 Jahre (550 Jahre)
α -Aerosole	0,01		>40 Jahre (900 Jahre)

Für die Praxis bedeutet dieses Ergebnis, daß eine Störung an

einer mit einem KAB Modell 1 abgeschlossenen Einlagerungskammer nur hinsichtlich eingelagerter radiumhaltiger Abfälle möglicherweise von Bedeutung ist. Diese Bedeutung ist vor dem Hintergrund des natürlich vorkommenden Radonpegels und der in Kapitel 3.1 genannten besonderen Konservativität der Zahlenwerte für Rn 222 sogar noch zu relativieren. Für eine Wiederherstellung der auslegungsgemäßen Barrierewirkung eines KAB Modell 1 entsprechend den in Kap. 2.3.1 aufgeführten Möglichkeiten erscheint ein Zeitraum von mindestens 110 Tagen mit großer Sicherheit ausreichend.

4.2 Meßmöglichkeiten bei Störungen an Einlagerungskammern mit KAB Modell 2 und Konsequenzen für Folgemaßnahmen

In Kap. 3.2 wird eine aufgrund eines fiktiven Druckanstiegs in einer mit einem KAB Modell 2 abgeschlossenen Einlagerungskammer gewollte Druckentlastung über das Drucküberwachungs- und -regelungssystem radiologisch analysiert. Die Dauer dieser Entlastung läßt sich gemäß Auslegung des Systems im Bereich $1 \text{ m}^3/\text{d}$ bis $100 \text{ m}^3/\text{d}$ /AGK 89b/ wählen. Beispielhaft wird hier eine Abblasezeit von 14 Tagen unterstellt, um den Überdruck in der Kammeratmosphäre von 50 mbar abzubauen.

Die Erfassung der Radioaktivitätsableitungen bei einer solchen Störung "Abblasen" kann prinzipiell mit denselben radiologischen Meßmethoden erfolgen wie bei einer Störung an einem KAB Modell 1, siehe Kap. 4.1. Zusätzlich ist aufgrund des vorhandenen Drucküberwachungs- und -regelungssystems eine Druckmessung und eine Probenahme der Kammeratmosphäre möglich und vorgesehen. Ein Abblasen wird bewußt herbeigeführt. Aufgrund der Ausmessung von vor dem Abblasen oder während der Abgabe genommenen Luftproben aus der Kammeratmosphäre kann die mit dem Abblasen abgegebene Aktivität ermittelt werden: Nach Kap. 2.4.3 (Tab. 11) ist in der Kammer mit den in Tabelle 20 aufgeführten Werten der Aktivitätskonzentration zu rechnen. Eine quantitative meßtechnische Bestimmung solcher Werte ist ohne Schwierigkeiten möglich, wie die mit aufgeführten Nachweisgrenzen CNWGR zeigen.

Für die Beurteilung der radiologischen Signifikanz der störungsbedingten Aktivitätsableitung wird der in Kap. 3.2 (Tab. 17) vorgenommene Vergleich mit den Antragswerten für die jährliche Aktivitätsableitung mit den Abwettern herangezogen.

Die Antragswerte werden für H 3, C 14 und Rn 222 lediglich im Prozentbereich bis maximal 11,5 % für C 14 (flüchtig) im Falle einer 40-jährigen Kammerstandzeit ausgeschöpft. Der Ausschöpfungsgrad der ebenfalls freigesetzten Mengen an I 129 (unspezifiziert) und Aerosolen ist mit $<0,00002$ % vernachlässigbar. Da die Ableitung gezielt über 14 Tage vorgenommen wird, gilt der ermittelte Ausschöpfungsgrad auch für die potentielle jährliche Dosis an der ungünstigsten Einwirkungsstelle in der Umgebung der Anlage. Die Störung ist ohne radiologische Signifikanz. Außer der gezielten zeitlichen Streckung der Druckentlastung sind keine weiteren Maßnahmen erforderlich.

Tabelle 20: Aktivitätskonzentrationen in der Atmosphäre einer mit einem KAB Modell 2 abgeschlossenen Einlagerungskammer im Vergleich mit nuklidspezifischen Nachweisgrenzen CNWGR

Freigesetztes Radionuklid	Aktivitätskonzentration in Bq/m ³ Standzeit der Kammer			CNWGR Bq/m ³
	1 a	10 a	40 a	
H 3 (HTO)	1,0 E 9	6,3 E 8	1,2 E 8	HTO: 5 E-2 bei 50% rel. Luftfeuchte; 100 min Sammlung mit Molekularsieb
H 3 (HT)	bis 2,7 E 8	bis 1,2 E 9	bis 4,9 E 8	HT: Ähnlich HTO bei zusätzlicher Ver- wendung eines CuO-Katalysotars
C 14 (flüchtig)	7,9 E 6	7,1 E 7	2,0 E 8	CO ₂ : 1,5 E-2
C 14 (metall. Feststoffe)	1,6 E 2	1,5 E 3	4,4 E 3	(C 14)O ₂ : 1,5 E-2
Rn 222 (unfix.)	1,3 E 7	1,3 E 7	1,3 E 7	ca. 10 (± 60 %) *)
I 129	7,7 E-1	7,7 E-1	7,7 E-1	1 E-2 - 1 E-3 bei 10 d Sammlung *)
<i>β/β</i> -Aerosole (>1% Restfeuchte)	2,7 E 1	2,7 E 1	2,7 E 1	3,73 E-3 für <i>β/β</i> -Strahler
<i>β/β</i> -Aerosole (<1% Restfeuchte)	2,7 E-1	2,7 E-1	2,7 E-1	nach KTA 1503.1 *)
<i>α</i> -Aerosole	8,2 E-3	8,2 E-3	8,2 E-3	1,5 E-3 für <i>α</i> -Strahler nach KTA 1503.1 *)

*) vgl. detailliertere Angaben in Tab. 4.1

5. Literaturverzeichnis:

- /AGK 89a/ Arbeitsgemeinschaft Konrad
Strabag Bau - Sachtleben Bergbau GmbH
Kammerabschlußbauwerk Modell 1
Konzept und Systembeschreibung
Erläuternde Unterlage Nr. 255
Köln, Februar 1989
- /AGK 89b/ Arbeitsgemeinschaft Konrad
Strabag Bau - Sachtleben Bergbau GmbH
Kammerabschlußbauwerk Modell 2
Konzept und Systembeschreibung
Erläuternde Unterlage Nr. 266
Köln, März 1989
- /DBE 89a/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb
von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE)
Entwurfsplanung Strahlenschutz als beglei-
tende Planungsunterlage
Erläuternde Unterlage Nr. 282
Peine, März 1989
- /DBE 89b/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb
von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE)
Bewetterung
Erläuternde Unterlage Nr. 284
Peine, 21.04.1989
- /GRS 89a/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Systemanalyse Konrad, Teil 3
Freisetzung radioaktiver Stoffe aus Abfallgebinden
im bestimmungsgemäßen Betrieb der Schachanlage Konrad
Revision 2
Erläuternde Unterlage Nr. 260
GRS-A-1255, Dezember 1989
- /GRS 89b/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Systemanalyse Konrad, Teil 3
Gasbildung im Endlager Konrad während der Betriebsphase
Revision 1
Erläuternde Unterlage Nr. 273
GRS-A-1528, Dezember 1989

- /GRS 89c/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Systemanalyse Konrad, Teil 3
Ableitung von Aktivitätsgrenzwerten für die betriebliche
Praxis der Einlagerung radioaktiver Abfälle
Revision 2
Erläuternde Unterlage Nr. 261
GRS-A-1452, Dezember 1989
- /GRS 89d/ Gesellschaft für Reaktorsicherheit (GRS) mbH
Systemanalyse Konrad, Teil 3
Grundlagen der Ableitung von Aktivitätsbegrenzungen für
den bestimmungsgemäßen Betrieb der Schachanlage Konrad
Revision 1
Erläuternde Unterlage Nr. 262
GRS-A-1522, Februar 1989
- /GSF 81/ Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF) mbH
Institut für Tieflagerung, Braunschweig
Emissionsüberwachung der Schachanlage ASSE
R. Stippler, H. Kleimann, Vortrag auf der gemeinsamen
Strahlenschutztagung von FS/SFRP
Lausanne, 30.09. - 2.10.1981
- /GSF 85/ Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF) mbH
Institut für Tieflagerung
Kammerabschlußbauwerke, Theoretische Grundlagen
Erläuternde Unterlage Nr. 79
Braunschweig, den 15.05.1985
- /GSF 89/ Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung (GSF) mbH
Institut für Tieflagerung
Ergänzende Unterlagen zum Plan Endlager
Schachanlage Konrad
Bestimmung petrophysikalischer Parameter - AP 1 -
Braunschweig, den 21.07.1989
- /IFG 87/ Institut für Geologie und Paläontologie
der Technischen Universität Clausthal
Ergänzende Laboruntersuchungen an Versatzmaterial
der Schachanlage Konrad, Nr.: 87.4708
Clausthal, September 1987

- /IMM 89/ Institut für Metallkunde und Metallphysik
der Technischen Universität Clausthal
Abteilung Korrosion und Korrosionsschutz
Wasserstoffentwicklung und Sauerstoffverbrauch durch
Korrosionsprozesse unter Berücksichtigung der im End-
lager Konrad zu erwartenden Bedingungen
Clausthal, den 23.11.1989
- /MPA 87/ Amtliche Materialprüfanstalt für Steine und Erden
Bodenphysikalische Untersuchungen an einem
Versatzmaterial (Eisenerzprobe)
Prüfzeugnis Nr. M 7064
Clausthal-Zellerfeld, 16.01.1987
- /PAM 89/ Preussag AG Metall
Vollversatz in Einlagerungskammern
Laborphase 1 (Fördertechnik)
Bericht und Anlagenband
Erläuternde Unterlage Nr. 308
Goslar, 26.07.1989
- /PTB 89a/ Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB)
Anforderungen an endzulagernde radioaktive Abfälle
Vorläufige Endlagerungsbedingungen, Stand Mai 1989
- Schachtanlage Konrad -
PTB-SE-IB-53, Mai 1989
- /PTB 89b/ Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB)
Plan Endlager für radioaktive Abfälle
Schachtanlage Konrad
Salzgitter, März 1989
- /PTB 89c/ Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB)
Endlager Konrad, Ermittlung von betrieblichen
Erwartungswerten und bewertender Vergleich mit
den Antragswerten für bestimmungsgemäße Ablei-
tung radioaktiver Stoffe. Bewertung des Verfah-
rens zur Ermittlung der Werte der einlagerbaren
Radioaktivität
PTB-SE-IB-58, Erläuternde Unterlage Nr. 300
Braunschweig, September 1989

- /PTB 89d/ Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB)
Strahlenexposition der auf der Schachtanlage
Konrad unter Tage Beschäftigten durch natürlich
vorkommende Radioaktivität im Gestein
PTB-SE-IB-27, Erläuternde Unterlage Nr. 183
Braunschweig, März 1989
- /SIM 89a/ Siemens AG - Unternehmensbereich KWU
Beschreibung und Erläuterung des Meßkonzepts zur
Dichtigkeitsprüfung von Einlagerungskammern
mit Nachweis der Funktionsfähigkeit
Arbeitsbericht U 9241/89/65a
Erlangen, 28.04.89
- /SIM 89b/ Siemens AG - Unternehmensbereich KWU
Endlager Konrad
Druckentlastungssystem für die Einlagerungskammer
Technischer Bericht U 74/89/015
Offenbach, 07.04.89